

AALTO-YLIOPISTO

SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan ja automaation laitos  
Valaistusyksikkö

Jukka Virtanen

Valaistuksen vaikutus lämpöviihtyvyyteen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten    Espoossa 18.05.2015

Työn valvoja Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja Eino Tetri

Tekijä: Jukka Virtanen

Työn nimi: Valaistuksen vaikutus lämpöviihtyvyyteen

Päivämäärä: 18.5.2015

Sivumäärä: 55

Sähkötekniikan ja automaation laitos, Valaistusyksikkö

Professori: Valaistustekniikka ja sähköinen talotekniikka

Koodi: S-118

Valvoja: Professori Liisa Halonen

Ohjaaja: Erikoistutkija Eino Tetri

Tiivistelmäteksti:

Väri-lämpö hypoteesin mukaan ihminen aistii viileää kylmillä väreillä, esim. sininen ja lämmintä lämpimillä väreillä, esim. punainen. Väri-lämpö hypoteesin vaikutusta ihmiseen, valaistuksen värilämpötilaa (*CCT*) muuttamalla, on tutkittu vähän. Aiemmat tutkimukset väri-lämpö hypoteesista ovat kohdistuneet lähinnä värien muuttamiseen pinnoista, esim. seinät maalaamalla, heijastamalla värillinen dia tai käyttämällä värillistä filtriä. Tässä diplomityössä on esitelty aiempia tutkimuksia. Työssä on tutkittu valaistuksen vaikutusta lämpöaistimukseen ja lämpöviihtyvyyteen.

Tässä työssä on tutkittu kahdella huonelämpötilalla (20 °C ja 26 °C) 16 koehenkilöä. Kokeen aikana muutettiin värilämpötilaa (*CCT*) lämminsävyisestä kylmäsvyiseen portaittain (14 eri värilämpötilaa). Kokeessa koehenkilöt eivät havainneet muutosta. Kokeen aikana valaistusvoimakkuus oli vakio. Samat koehenkilöt suorittivat kokeen molemmilla huonelämpötiloilla. Koehenkilöt täyttivät tuntemuksistaan kyselylomakkeen, ensimmäisen värilämpötilan ollessa lämmin (2733 K), toisen värilämpötilan ollessa neutraali (4084 K) ja kolmannen kylmä (6208 K).

Kokeessa väri-lämpö hypoteesin vaikutusta, värilämpötilaa (*CCT*) muuttamalla ei saatu todennettua.

Matalammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan **viileänä** kaikilla värilämpötiloilla (*CCT*). Korkeammalla huonelämpötilalla koettu lämpötila oli **hieman lämmin** 2733 K värilämpötilalla. 4084 K värilämpötilalla koettu lämpötila oli **neutraali**. 6208 K värilämpötilalla koettu lämpötila oli **hieman lämmin**.

Matalammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan **hieman epäviihtyisänä** kaikilla värilämpötiloilla. Korkeammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan **hieman viihtyisänä** kaikilla värilämpötiloilla.

Avainsanat: Väri-lämpö hypoteesi, lämpöaistimus, lämpöviihtyvyys

Author: Jukka Virtanen

Name of the thesis: Illumination effect of thermal comfort

Date: 18.5.2015

Number of pages: 55

Department of electrical engineering and automation, Lighting unit

Professorship: Illumination engineering and electrical building services Code: S-118

Supervisor: Professor Liisa Halonen

Instructor: Senior Researcher Eino Tetri

Abstract text:

According to hue-heat hypothesis a human being senses coolness in cold colors e.g. blue and warmth in warm colors e.g. red. The hue-heat effect is not well studied by changing the correlated color temperature (CCT) of lighting. Earlier studies on hue-heat hypothesis have been done by changing the colors of the room surfaces for example by painting the walls, by projecting a colored slide, or by using a color filter. The previous studies are presented in this thesis. The effect lighting has on thermal sensation and thermal comfort is studied.

In this study two room temperatures (20°C and 26°C) was studied with 16 subjects. During the test the correlated color temperature (CCT) was shifted from warm to cold in 14 steps. The subjects were not able to detect this change. The illuminance level stayed constant during the test. Same group of subjects executed the test with both room temperatures. Subjects described their sensations by filling a questionnaire thrice: on warm (2733K), neutral (4084) and cold (6208K) correlated color temperature.

In this study the effect of hue-heat hypothesis could not be verified by changing the CCT.

On the lower room temperature subjects sensed the temperature **cool** with every CCT. On the higher room temperature subjects sensed the temperature **slightly warm** on warm CCT. With neutral CCT room was sensed **neutral**. With cold CCT room was sensed **slightly warm**.

On the lower room temperature subjects experienced the temperature **just uncomfortable** with every CCT. On the higher room temperature subjects experienced the temperature **just comfortable** with every CCT.

Keywords: hue-heat hypothesis, thermal sensation, thermal comfort

## **Alkulause**

Kiitän työn valvojaa Prof. Liisa Halosta kiinnostavasta diplomityön aiheesta.

Kiitän työn ohjaajaa Erikoistutkija Eino Tetriä koetilan kehittämisestä diplomityön vaatimuksiin soveltuvaksi sekä pitkäjänteisestä ohjaamisesta työn edetessä.

Kiitän Johtava tutkija Pekka Tuomalaa, Teknologian tutkimuskeskus VTT kokeen kehittämisavusta, materiaalista ja mittalaitteista.

Kiitän Tutkija Rupak Raj Baniyaa koetilan kehittämisestä ja ohjausavusta.

Kiitän Tohtorikoulutettava Mikko Maksimaista testikoehenkilönä olemisesta ja ohjausavusta.

Kiitän kaikkia 16 koehenkilöä, jotka osallistuivat molempiin kokeisiin.

Espoossa toukokuun 18.2015

Jukka Virtanen

# Sisällysluettelo

ALKULAUSE.....	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
1 JOHDANTO .....	7
2 AIKAISEMPI TUTKIMUS.....	8
2.1 VÄRIEN VAIKUTUS VIREYSTILAAN JA MIELIALAAN .....	8
2.2 VÄRI-LÄMPÖ HYPOTEESI (THE HUE-HEAT HYPOTHESIS) .....	14
2.2.1 Käsitys lämpimästä ja viileästä.....	14
2.2.2 Ympäristön lämpötila.....	15
2.2.3 Yhteys kaksitasoiseen värilämpö hypoteesiin.....	18
2.3 AUTONOMINEN VIREYSTILAN JA MIELIALAN MUUTOS .....	18
2.4 Uudemmat väritutkimukset .....	19
2.4.1 Näet punaista, tunnet lämmintä?.....	19
2.4.2 Ympäristön lämpötilan ja valonlähteen vaikutus näkömukavuuteen.....	20
3 VTT-LÄMPÖAISTIMUSMALLI .....	23
3.1 IHMISEN YKSILÖLLISTEN OMINAISUUKSIEN VAIKUTUS LÄMPÖAISTI-MUKSEEN.....	23
3.2 TERMISELLÄ IHMISMALLILLA PAREMPAAN LÄMPÖVIIHTYVYYTEEN.....	25
4 MENETELMÄT .....	28
4.1 KOETILA .....	28
4.2 HUONEEN LÄMPÖTILA .....	29
4.3 VALAISTUS .....	31
4.4 KOEHENKILÖT .....	33
4.5 KYSYMYSLOMAKKEET .....	33
4.5.1 Esitietolomake .....	33
4.5.2 Lomakkeet kokeen aikana .....	34
4.6 KOKEEN KULKU .....	35
5 TULOKSET .....	38
5.1 ARVIO LÄMPÖVIIHTYVYYDESTÄ .....	38
5.2 ARVIO LÄMPÖAISTIMUKSESTA .....	39
5.3 KÄYTTÄJIEN ARVIOT .....	40
5.4 LÄMPÖTILAN MITTAUS.....	41
5.5 VÄRILÄMPÖTILA (CCT) VS. YKSITTÄINEN LÄMPÖTILA T (°C) .....	42
5.6 YHTEENVETO .....	43
6 POHDINTAA.....	44
6.1 VÄRI-LÄMPÖ HYPOTEESI .....	44
6.2 VALAISTUKSEN VÄRILÄMPÖTILA .....	44
7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	46
7.1 VÄRI-LÄMPÖ HYPOTEESI .....	46
7.2 LÄMPÖVIIHTYVYYS .....	46
7.3 LÄMPÖAISTIMUS .....	46
7.4 KÄYTTÄJIEN ARVIOISTA .....	47
KIRJALLISUUS.....	48
LIITTEET .....	49

## Symboli- ja lyhenneluettelo

BMI	painoindeksi ( <i>Body Mass Index</i> )
°C	Celsius
CCT	ekvivalenttinen värilämpötila ( <i>correlated color temperature</i> )
CLO	lämmöneristys, vaatteet ( <i>thermal insulation of clothes</i> )
CRI	värintoistoindeksi ( <i>Colour Rendering Index</i> )
E	valaistusvoimakkuus
h	korkeus
Hlö	henkilö
HTM	ihmisen lämpömalli ( <i>Human Thermal Model</i> )
K	Kelvin
Ka.	keskiarvo
kg	kilogramma
lm	lumen
m <sup>2</sup>	neliömetri
MET	metabolinen ekvivalentti ( <i>metabolic equivalent</i> )
m/s	metriä sekunnissa
PMV	ennustettu keskimääräinen ääni ( <i>Predicted Mean Vote</i> )
PPD	ennustettu tyytymättömien prosentuaalinen määrä ( <i>Predicted Percentage Dissatisfied</i> )
SD.	keskihajonta
W	Watti

# 1 Johdanto

Tässä diplomityössä on tutkittu Aalto-yliopiston Sähköteknisessä korkeakoulussa väri-lämpö hypoteesin vaikutusta ihmiseen, valaistuksen värilämpötilan (*CCT*) muuttuessa. Työssä on tutkittu valaistuksen vaikutusta lämpöaistimukseen ja lämpöviihtyvyyteen. Kehon lämpötilaa arvioitiin värilämpötilan (*CCT*) muutoksena.

Väri-lämpö hypoteesia on aiemmin tutkittu väreillä. Aiheesta on tehty lähiaikoina vähän tutkimuksia. Diplomityössä on esitetty aiempia tutkimuksia. Kiinnostus väri-lämpöhypoteesin vaikutuksia kohtaan on kasvanut energia-tehokkuusvaatimusten kasvaessa sekä valaistuksen ohjauksen ja valonlähteiden kehityksen myötä. Koetila oli varustettu älykkäällä LED-valaistuksella. Valaistuksen värilämpötilaa (*CCT*) voitiin muuttaa valaistusvoimakkuuden pysyessä vakiona. Tilan lämpötila pidettiin vakiona kahdella eri huonelämpötilalla.

Tutkimuksessa väri-lämpö hypoteesi tarkoittaa huonelämpötilan kokemista lämpimänä 2733 K värilämpötilassa (*CCT*), viileänä 4084 K värilämpötilassa ja viileämpänä 6208 K värilämpötilassa.

Tutkimus toteutettiin 16 koehenkilöllä. Kaksi koehenkilöä osallistui kokeeseen kerrallaan, kumpikin istuen pöydän ääressä paikallaan. Värilämpötilaa (*CCT*) muutettiin kokeen aikana 14 kertaa, niin vähän kerrallaan että koehenkilöt eivät havaitse muutosta. Koehenkilöt täyttivät esitietolomakkeen lisäksi kolme testilomaketta. Ensimmäinen testilomake täytettiin värilämpötilan (*CCT*) ollessa 2733 K, toinen 4084 K ja kolmas 6208 K. Testilomakkeet olivat samanlaisia joka kierroksella. Koko koe tehtiin kaikille koehenkilöille kaksi kertaa kahdella eri termisellä lämpötilalla.

Tutkimuksessa oli mukana Teknologian tutkimuskeskus VTT. Tutkimuksen jälkeen mitattiin osa koehenkilöistä *Body Explorer*-mittalaitteella. Osasta koehenkilöitä mitattiin lämpötila useasta kohtaa kehoa *Datalogger*-mittalaitteella. Nämä mittaukset tukivat omalta osaltaan diplomityötutkimusta.

Löydetyn aineiston valossa tutkimusmenetelmää kehittämällä ja koehenkilöiden määrää kasvattamalla, aihealueesta voi löytyä kiinnostavia sovelluksia talotekniikan ja ihmisten viihtyvyyden kehittämiseen.

## 2 Aikaisempi tutkimus

Erilaisia värejä on joka puolella ympäristössämme. Maalattuja pintoja on sekä ulkona että sisällä ja myös keinotekoisesti valaistuin. Ovatko värin vaikutukset ihmiseen niin äärimmäiset, että fyysinen ja henkinen hyvinvointi riippuu niistä? Voisiko värityömyys olla ulko- ja sisätiloissa paitsi syy rumuudelle ja ikävystymiselle, myös syyllinen fysiologiseen vaivaan tai stressireaktioon? Tarkoituksena on tarkastella väritutkimusta ihmisen viihtyvyyteen kolmen asian kautta, jotka ovat väri, vireystila ja mukavuus. Nämä ovat aiheuttaneet huomattavaa sekaannusta viimeisten 50 vuoden aikana (Environmental Simulation, s. 163).

Suurin osa tutkimuksista on tehty simuloiduissa tilanteissa, joista osa ei ole todellisia. Ensin kysytään värin vaikutusta yleiseen ihmisten fysiologiseen tilaan, johon viitataan tavallisesti termeillä vireystila tai stressaava. Sitten tarkastelemme väritutkimuksen ja subjektiivisen ajan suhdetta. Onko totta, että aika kuluu nopeammin punaisessa huoneessa vai onko se toisinpäin? Kolmas tarkastelukohta on, onko väreillä olemassa mitään todellista vaikutusta (ympäröivään) lämpöviihtyvyyteen? (Environmental Simulation, s. 163).

Yleensä ajatellaan että punainen väri näyttää lämpimältä ja sininen kylmältä. Jos ihmiset todella voivat tuntea lämpimämmäksi punaisen tilan kuin sinisen, voisivatko he silloin pienentää lämmitystä? Jotta voidaan tuoda esiin tiettyjä ristiriitoja nykyisessä väritutkimuksessa, esitys on rajattu näihin kolmeen teemaan (väri, vireystila ja mukavuus) (Environmental Simulation, s. 163).

Tulkinta laboratorio- ja kenttätiedoista, eli teorian soveltaminen arkeen, edellyttää huomattavaa varovaisuutta. Keskusteltaessa näiden alojen ristiriidoista, korostamme menetelmiin liittyviä kysymyksiä, jotka saattavat auttaa ratkaisemaan ainakin joitakin ristiriitoja (Environmental Simulation, s. 164).

Rikard Küller ja Byron Mikellides ovat käsitelleet laaja-alaisesti väripsykologiasta tehtyjä tutkimuksia 1993 kirjassa Environmental Simulation . Tämän jälkeen käsitellään tutkimusta valaistuksen vaikutuksesta lämpöviihtyvyyteen (Gesche Huebner et al. , 2014).

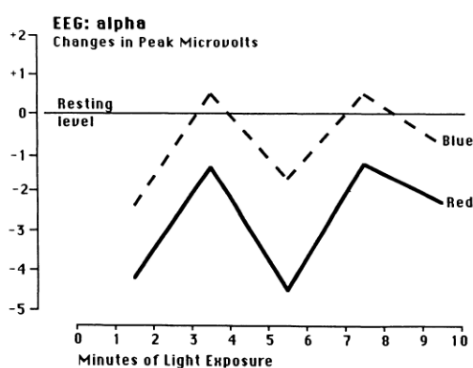
Toinen uudempi tutkimus käsittelee lämpötilan ja valonlähteen vaikutusta näkömukavuuteen (C Laurentin et al. , 2014). Väri-lämpö hypoteesista on vähän tutkimuksia ja ne ajoittuvat 1960 ja 1980 luvuille.

### 2.1 Värien vaikutus vireystilaan ja mielialaan

Värejä on luokiteltu ja ryhmitelty monin eri tavoin. Yleisimmin käytetty ryhmittely on lämpimät ja viileät värit. Punainen, oranssi ja keltainen ovat lämpimiä. Sininen, turkoosi ja vihreä ovat viileitä. Soveltaminen perustuu näihin väitettyihin ominaisuuksiin, värin käyttö ei rajoitu arkkitehteihin ja taiteilijoihin, vaan myös sairaalat ovat yrittäneet rauhoittaa tai vähentää aggressioita ahdistuneilla potilailla käyttämällä sinistä ja vihreää. Masennuspotilaita on piristetty käyttämällä punaista ja oranssia väriä (Environmental Simulation, s. 164).



Käyttämällä yhdistelmänä musiikkia ja väriä, Neboschick (1975) kertoi onnistuneensa johtaa ryhmä masennuspotilaita kohti lisääntyvän iloisen tunnelman tilaa. Goldsteinin (1942) mukaan, Parkinsonin tautipotilaiden vakavuus vähentyy, jos potilaat suojataan punaiselta ja keltaiselta väriltä käyttämällä esimerkiksi silmälasien vihreitä linsskejä. Goldsteinin kokeista saatiin lukuisia eroja värikäyttäytymiseen, mutta tieteellisen tarkkuuden puute on johtanut monet tutkijat epäilemään löydöksiä. Toisaalta, Schauss 1979 väitti, että vaaleanpunainen väri on toiminut luonnostaan rauhoittavana. Vaaleanpunaista oli onnistuneesti käytetty vähentämään aggressiivista käyttäytymistä vankien keskuudessa. Näitä tuloksia ei onnistuttu toistamaan myöhemmissä tutkimuksissa. On myös syytä huomata, että ensimmäisessä laboratoriotutkimuksessa ei eroja lämpimän ja viileän värin välillä löytynyt mittauksissa autonomisen hermoston vasteesta, kuten sykkeestä ja hengityksestä, eikä eri suorituskäytävissä, kuten nopeus sormella napauttamalla ja tämän toistossa. Kuitenkin havaittiin, että pinnan kirkkaus korottaa suorituskäytävää (Environmental Simulation, s. 165).



**Kuva 1. Keskimääräiset muutokset alfa amplitudilla punaisessa ja sinisessä valossa (Environmental Simulation, s. 165).**

Alfa-aallot ovat laajalti hyväksytty merkki aivojen fysiologisesta rentoutumisesta. Alempi alfa amplitudi ilmaisee aivokuoren vireystilan kasvun (Environmental Simulation, s. 165). Vasta 1958 oli ensimmäinen kehittynyt tutkimus, joka tehtiin värivaikutusten arvioimiseksi sekä keskus- että autonomisen hermoston järjestelmiin. Gerardin kokeessa punaista, sinistä ja valkoista valoa käytettiin yhteensä 10 minuuttia per valo. Koehenkilöiden edessä oli pyöreä läpikuultava näyttö, joka oli noin 30 senttimetriä halkaisijaltaan, johon eriväristä valoa kohdistettiin 50 senttimetrin etäisyydeltä. Kokeen aikana näytettiin kolmea eri valoa, joka johti aivokuoren autonomisiin toimintoihin. Gerardin tärkein havainto perustuu alfa-aaltojen esiintyvyyteen aivosähkökäyrässä (EEG). Aivot ovat enemmän aktiivisia punaisessa valaistuksessa kuin sinisessä (Kuva 1) (Environmental Simulation, s. 165).

Gerard havaitsi merkittäviä eroja systolisessa verenpaineessa, kämmenien ihon johtokyvyssä (galvaaninen ihovaste, GSR), hengitystiheydessä ja silmän räpsyttelyn taajuudessa. Nämä indeksit olivat hieman alhaisemmat sinisen kuin punaisen aikana, jonka Gerard tulkitsi ilmaisevan vähentynyttä autonomista vireystilaa. Kuitenkin niin kauan kuin syke oli levoton, ei poikkeamaa yleisesti todettu. Syke nousi punaisessa valossa enemmän kuin sinisessä valossa, kahden viimeisen minuutin aikana syke laski punaisessa valossa (Environmental Simulation, s. 165).

Wilson (1966) esitteli koehenkilöille viisi punaista ja viisi vihreää diaa vuorojärjestyksessä, kesto oli muutamia minutteja. Koehenkilöt istuivat tummassa kopissa katsoen 60 senttimetrin neliönmuotoista läpikuultavaa näyttöä, joka oli 1,2 metriä heidän edessään. Ihon sähkönjohtavuutta seurattiin jatkuvasti. Wilson totesi, että galvaaninen ihon vaste oli koetilanteessa suurempi punaisella kuin sinisellä ( $p < .05$ ). Kuitenkin, Wilson ei huomionnut värien kirkkautta, joten tulos johtui kirkkauden suuruudesta, jonka Pressey oli löytänyt aiemmin (Environmental Simulation, s. 166).

Ali (1972) jalosti edelleen Gerardin havaintoja tukevaa näyttöä aivokuoren tasolla. Alin tutkimuksessa värillinen ärsyke (punainen tai sininen valo) oli kohdistettu suoraan henkilön silmiin, projektori oli 75 senttimetrin päässä. Kaksi kirkasta värillistä valoa kohdistettiin kuhunkin koehenkilöön. Aivosähkökäyrää kirjattiin koko ajan ja stimulaation jälkeen yksi minuutti lepotilanteessa. EEG tietoja määrittämällä ja viemällä ne läpi Muirhead matalataajuusanalysaattoriin saatiin prosenttiosuutena alfa elpymisen aikana, kun on altistettu kahdelle eriväriselle valolle. Tulokset osoittivat suurempaa esiintymistä alfa aallolla sinisessä kuin punaisessa valossa ( $p < .02$ ). Tämä havainto osoittaa, että aivokuoren sopeutumisvaste (CHR) punaisessa valossa on viivästynyt enemmän kuin sinisessä valossa ja tulos oli tulkittu niin että, aivokuoren viireystila muuttuu enemmän punaisen valon esittämisen jälkeen. (Environmental Simulation, s. 166).

Jacobs ja Hustmyerin kokeessa (1974), arvioitavat värit oli valittu ISCC-NBS värikartasta. Ryhmä valitsi ne värit, jotka olivat lähimpänä sävyltään punaista, keltaista, vihreää ja sinistä. Nämä värit jäljennettiin dioille ja heijastettiin näytölle (0,6 x 0,8 m), joka sijaitsi kolme metriä koehenkilöiden edessä, dia vaihtui ja tiedot tallennettiin aina minuutin välein, mitattiin galvaaninen ihovaste, sydän ja soluhengitysnopeus, tallennetaan. Kaikki värit esitettiin samalla luminanssitasolla. Esiintyi värivaikutus GSR (*Galvanic skin response*), mutta ei muita havaintoja. Punaisella oli suurin viireystila, jonka jälkeen vihreä, keltainen ja sininen ( $p < .05$ ) (Environmental Simulation, s. 166).

Toisessa kokeessa Caldwell ja Jones (1985) esittivät tutkittaville sarjan punaista, valkoista ja sinistä valoa. Valo heijastettiin seinälle koehenkilöiden edessä. Seinä oli päällystetty valkoisella paperilla. Psykofyysinen menetelmä, jossa syntyi virhettä värien kirkkauseroista, joita ei ollut otettu huomioon. Mittauksena otettiin silmän vilkkuminen, ihon sähkönjohtavuus, sormen pulssi syke, ja EEG. EEG tietoja analysoitiin tehospektrianalysaattorilla, huippu EEG taajuus, ja prosenttiosuus alfa-aaltohiukkasaktiivisuudesta. Värien ei havaittu aiheuttavan eroja missään kolmesta aivokuoren ja neljästä autonomisesta mittauksesta. Suurin ongelma kokeessa oli kuitenkin, että Caldwell ja Jones käyttivät vain 30 ja 45 sekunnin aikaväliä, mikä johti melko monimutkaiseen koeasetelmaan. Kauaskantoisia vaikutuksia suunnitteluun on saatu tutkimustuloksista, joka oli punaisen värin kiihdyttävä vaikutus. Tulokset ovat kaukana vakuuttavasta ja väristimulaatio oli joko värillistä valoa tai värilaikkuja, värjäytyssä ympäristöissä (Environmental Simulation, s. 166).

Lundin kokeissa yritettiin edellä tarkasteltujen poikkeavien havaintojen välinen kuilu kuroa umpeen. Miksi käyttää värillistä valoa tai värikarttaa, kun sen sijaan pinta pigmenttejä voidaan soveltaa todellisissa tiloissa eli minkälaisia tiloja me oikeastaan haluamme kokea? Miksi testi on lyhytaikainen, vaikka koehenkilöt voivat altistua paljon pidempään, kuten he yleensä ovat arjen tilanteissa? (Environmental Simulation, s. 167).

Fysiologisen vaikutuksen koko visuaalisessa ympäristössä, oli havainnollistanut ensimmäisenä Küller (1976, 1986) tutkimuksessa, jossa oli kaksi huonetta (3,5 x 4,3x 2,5 m), jotka olivat täysin erityyppisiä (Environmental Simulation, s. 167).

Yhdessä huoneessa otettiin käyttöön paljon värejä ja kuvioita, jotta voidaan luoda ympäristö, jonka visuaalinen monimutkaisuus on suuri. Toinen huone oli maalattu harmaaksi, vähentämään visuaalista monimuotoisuutta. Huoneet olivat valaistu hehkulampulla ja valaistusvoimakkuudet mitattiin luksimittarilla. Koehenkilöt suorittivat erilaisia tehtäviä, yhteensä kolme tuntia jokaisessa huoneessa. Tänä aikana suoritettiin useita mittauksia, muun muassa EEG ja syke (kuva 2) (Environmental Simulation, s. 167).

Tulokset osoittivat, että värit ja kuviot kannustavat aivojen sähköistä toimintaa. Alfa-komponentti EEG, mitattuna analogisella tehoanalyysillä, oli huomattavasti pienempi värikkäässä huoneessa kuin harmaassa ( $p < 0,025$ ), mikä osoittaa korkeampaa kiihtymistä. Lisäksi syke oli alhaisempi värikkäässä tilassa ( $p < .05$ ), joka on visuaalisesti monimutkaisempi, mikä voidaan tulkita vasteena korvaaviin autonomisiin visuaalisiin liikatoimintoihin. Havaittiin myös, että kaikkein rauhallisimmilla koehenkilöillä syke väheni peräti 10 %, kolmen tunnin altistuksen aikana (Environmental Simulation, s. 167).

Koehenkilöitä pyydettiin arvioimaan kaksi koehuonetta. Henkilön ollessa stressaantunut, tämä saattaa kokea olosuhteessa paniikkia. Harmaassa huoneessa, jo alusta alkaen, koehenkilöt ilmoittivat korkeista tuntemuksista valvonnalle. Monimutkaisessa huoneessa kesti jopa kolme tuntia, ennen kuin tuntemuksia saatiin aikaan ( $p < 0,005$ ). Stressireaktiot olivat selvempiä miehillä kuin naisilla. Korostuneen vaikutuksen perusteella, erityisesti syke- ja aivojen aalto aktiivisuudessa, voidaan päätellä, että väreillä ja visuaalisella monimutkaisuudella näkökentässä on paljon laajempi vaikutusvalta ihmisiin kuin tähän asti oli oletettu (Environmental Simulation, s. 167).

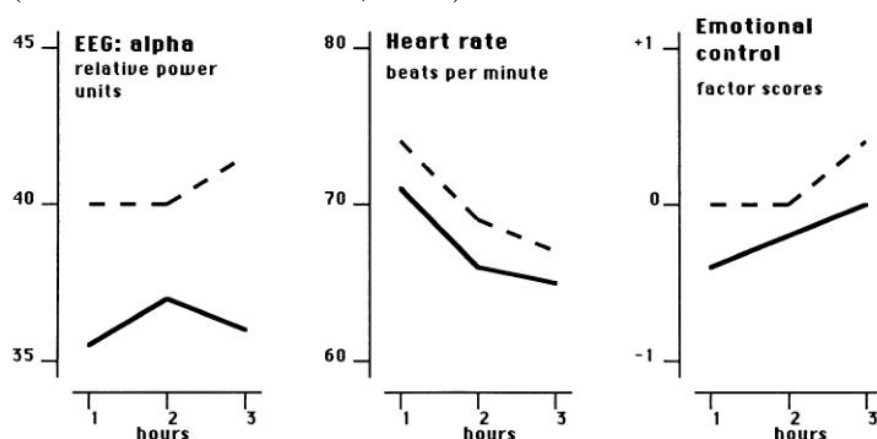
Toisessa tutkimuksessa Lundissa oli kaksi huonetta (2,9 x 2,9 x 3,0 m). Yksi huone oli maalattu punaisella (NCS 1958 Y90R) ja toinen sinisellä (NCS 2is8 B09G). Värit olivat rinnastettavissa keveyteen ja värikylläisyyteen. Heijastusarvojen sävyjen puhtautta tarkasteltiin spektrin heijastusarvojen avulla. Erityistä huomiota kiinnitettiin sisätilojen suunnitteluun, jotta ne näyttäisivät kotoiselta. Kuvia, verhot, listat ja matot otettiin käyttöön (Environmental Simulation, s. 169).

Koehenkilö vietti 2 1/2 tuntia molemmissa huoneissa, kahdella eri käynnillä kahden viikon aikana. EEG (analoginen tehospektri analyysi) ja syke nauhoitettiin ja koehenkilöt täyttivät lomakkeita subjektiivisista reaktioista, kuten lämpötila ja aika-arviointi, sekä ympäristön kuvaukset semanttisen eroasteikon ja raportin kirjoittamisen avulla. Ikkunasta valkoisiin verhoihin tulevan luonnonvalon lisäksi valaistus saatiin kahdeksalla päivänvalolampulla. Valaistusvoimakkuudet mitattiin tilassa välittömästi ennen ja jälkeen jokaisen istunnon (Environmental Simulation, s. 169).

Sikäli kun värillä on vaikutus aivokuoren vireystilaan, kaksi EEG taajuutta (delta ja alfa) tukivat myönteisesti hypoteesia, jonka mukaan punainen on enemmän aktivoiva kuin sininen (Taajuuksilla theta ja beta ei havaittu eroja kahdessa värissä). Delta aallot ovat suuri amplitudisia ja matalataajuisia, luonteenomaisia unisessa ja tokkuraisessa tilassa (Environmental Simulation, s. 169).

Delta aaltoja löytyi enemmän sinisellä värillä ( $p = 0,02$ ). Alfa rytmin vaimennuksen tiedetään olevan tärkein indikaattori aivokuoren kiihtymiselle. Alfa rytmi oli myös odotetun suuntainen, vaikka suuntaus ei tilastollisesti ollut merkitsevä. Syke oli pienempi punaisessa huoneessa kuin sinisessä ( $p = 0,03$ ). Tämänkin voidaan tulkita korvaavan autonomista vastetta (Environmental Simulation, s. 169).

Useimmat tutkimuksissa mainitut mittaukset antavat tukensa oletukseen, että väri vaikuttaa yksilön kiihtymisen tilaan. Aivokuoren vireystilaa arvioidaan mahdollisella alfa vaimennuksella, näyttö on vahva sekä värillisillä valoilla että värillisessä ympäristössä: Kokeissa altistus kerralla vaihtelee muutamasta minuutista useisiin tunteihin. Ympäristö, jossa on paljon värejä ja kuvioita ja varsinkin lämmintä punaista väriä, aktivoi aivoja, kun taas harmaa ja sininen vähentävät aktivointia. Tätä tukee delta aaltojen hallitsevuus sinisessä ympäristössä, joka ilmeni yhdessä tutkimuksessa. Tarkasteltaessa autonomisen järjestelmän eri mittaustuloksia, kokonaiskuvasta tulee epäselvä. Sydämen sykkeen hidastuminen havaitaan joissakin tutkimuksissa, joka näyttää osoittavan mahdollisuutta paradoksaaliseen autonomiseen reaktioon (Environmental Simulation, s. 170).



**Kuva 2.** Kaksi koehenkilöä istuu koehuoneessa Lundin ensimmäisessä tutkimuksessa, aivokuoressa autonomisia tunnereaktioita. Yhtenäinen viiva oli suuri visuaalinen monimutkaisuus. Katkoviiva oli alhainen visuaalinen monimutkaisuus. (Environmental Simulation, s. 170).

Siten on erittäin todennäköistä, että koehenkilöiden visuaalinen värin kenttä kokeessa ja jokapäiväisessä ympäristössä vaikuttaa fysiologiseen tilaan koehenkilöissä. Yksi käytännön seuraus olisi palkata värisuunnittelija suorittamaan pieniä muutoksia huomioiden yksilöiden yleinen vireystilan taso. Esimerkiksi lämpimiä värejä voidaan hyödyntää lisäämään ylimääräistä vireystilaa muuten yksitoikkoihin tilanteisiin. Sinisellä värillä on rauhoittava vaikutus, joten se saattaa edistää henkistä luovuutta. Kuitenkin värien käyttö näihin tarkoituksiin ei saa koskaan olla äärimmäistä, paitsi ehkä tulevaisuuden pitkäaikaisissa kokeissa. Ei ole mahdollista tai toivottavaa käyttää väriä, jolla kompensoidaan tylsää ja yksitoikkoista työtehtävää. Tällainen käyttö lisää todennäköisesti stressiä (Environmental Simulation, s. 170).

Väri- ja aika-arviot ovat ehkä vieläkin sekavia ja ristiriitaisia, niin kuin oli väripsykologiassa. Jotkut tutkimukset viittaavat siihen, että lämpimät värit nopeuttavat subjektiivista kokemusaikaa, verrattuna viileisiin väreihin, kun taas jotkut tutkimukset osoittavat päinvastaista (Environmental Simulation, s. 172).

Porter ja Mikellides (1976) raportoivat tutkimuksesta, jossa amerikkalainen psykologi toteutti kokeen, jossa oli kaksi samanlaista 20 minuutin luentoa. Kokeessa oli kaksi erillistä yleisöä, toinen sinisessä ja toinen punaisessa luentosalissa. Punaisessa salissa olleen luennon kesto aliarvioitiin ja sinisessä olleen yliarvioitiin (Environmental Simulation, s. 172).

Mahnke ja Mahnke mainitsivat kokeesta (1975), jossa oli kaksi ryhmää myyntimiehiä. Heiltä otettiin pois rannekellot, yksi ryhmä osallistui kokoukseen punaisessa huoneessa, toinen vihreässä. Punainen ryhmä arvioi viettäneensä kaksi kertaa niin paljon aikaa kuin he todellisuudessa olivat olleet. Vihreä ryhmä arvioi viettäneensä vähemmän aikaa kokouksessa, kuin se todellisuudessa oli kestänyt. Tässä tapauksessa aikaväli oli yliarvioitu punaisessa huoneessa ja aliarvioitu vihreässä. Näihin tutkimuksiin viitataan yhä uudestaan ja uudestaan, mutta ilmeisesti ne kärsivät puutteellisesta kontrollista (Environmental Simulation, s. 172).

On olemassa vain muutamia laboratorioissa tehtyjä tutkimuksia, joissa on suoraan osoitettu mahdollinen suhde värin ja subjektiivisesti koetun ajan välillä väriin ja subjektiiviseen aikaan. Nämä tutkimukset myös yrittävät suhteuttaa havaintonsa vireystilan teoriaan. Smets (1969) selvensi hypoteesia, että lämmin väri (punainen) verrattuna kylmään (sininen) ei ainoastaan lyhennä etäisyyttä tarkkailijaan, vaan väriärsyke lyhentää myös vaikutelmaa ajan kulumisesta. Smets altisti koehenkilöt punaiselle ja siniselle valolle 45 sekunnin ajan näytöllä (1,3 x 1,8 m), joka sijaitsi kaksi metriä koehenkilöiden edessä (Environmental Simulation, s. 172).

Kirkkaus oli näytöllä tasainen. Tutkija kysyi koehenkilöiltä arvioita, kuinka kauan kukin väri oli näytöllä. Koehenkilöt ajattelivat punaisen olevan ennustettaan lyhyemmän ajan kuin sinisen ( $p < 0,05$ ). Toisessa versiossa koetta potilaita pyydettiin ilmoittamaan, milloin he tunsivat toisen värin olevan näytössä yhtä kauan kuin ensimmäinen väri. Koehenkilöt kokivat, että punainen valo on ollut esitettynä lyhyemmän ajan kuin sininen valo. Smetsin mukaan subjektiivinen aika kuluu nopeammin punaisella kuin sinisellä. Lisäksi hän arveli, että ajankiihtyminen punaisella johtuu siitä, että lämpimät värit lisäävät vireystilaa enemmän kuin viileät värit (Environmental Simulation, s. 173).

Toinen samanlainen tutkimus toteutettiin Caldwellin ja Jonesin toimesta 1985. Tämän laajan tutkimuksen tarkoituksena oli testata punaiselle ja siniselle valolle altistumisen vaikutusta ajan arviointiin. Taustalla tutkittiin Smetsin hypoteesikokeilut siitä, että havaitut erot johtuivat vireystilasta. Koehenkilöille esiteltiin sarja punaista, valkoista ja sinistä valoa, joka heijastettiin valkoiselle seinälle aikaväleihin 35 ja 45 sekuntia. Tutkittavia pyydettiin laskemaan ensin ääneen aika kullekin värille ja toisena arvioimaan useita aikavälejä. Tulokset osoittivat, että väri ei aiheuttanut mitään johdonmukaista vaikutuksia edellä mainittuihin fysiologisiin toimenpiteisiin. Myöhemmissäkään tutkimuksissa ei ole pystytty osoittamaan vaikutusta punaiselle (Environmental Simulation, s. 173).

## 2.2 Väri-lämpö hypoteesi (the hue-heat hypothesis)

Olemme vakuuttuneita siitä, että punainen ja keltainen ovat lämpimiä ja sininen ja vihreä ovat viileitä värejä. Tämä on niin vahvasti juurtunut kieleemme, että se on tullut osaksi opetusta taiteessa ja arkkitehtuurissa kaikkialla maailmassa. Mahdollinen syy laajaan käsittelyyn kirjallisuudessa on näiden värien esiintyminen. Punainen ja oranssi ovat tulen värejä. Punainen on veren väri. Punaista käytetään luonnossa kun halutaan luoda tehokas signaali, joka houkuttelee tai karkottaa. Esimerkkeinä ovat kukon helttä, vaippapaviaani ja naisen posken punastuminen. Sininen on taivaan väri ja ruoho on vihreää. Kylmä on teräksen sinisyys, viileän harmaa on vihreä meri (Environmental Simulation, s. 176).

### 2.2.1 Käsitys lämpimästä ja viileästä

Monesti tutkimuksissa väri-lämpö hypoteesi huomioidaan sisustuksessa, esimerkiksi teatterit, ravintolat, sairaalat, tehtaat ja toimistot. Useimmat näistä tutkimuksista perustuvat sanalliseen värimallien yhdistämiseen. Käyttämällä 30 väriliuskaa Hogg (1969) totesi punaisten värien olevan yksiselitteisesti lämpimiä, kun taas sininen ja vihreä väri ovat viileitä. Keltainen ja violetti hallitsevat välitilaa. Sivikillä (1969) oli 71 värimallia, mittaamisessa käytettiin semanttista differentiaalia. Myöhemmälle faktorianalyysille nimetään neljä tekijää, jotka ovat arviointi, mielenliikutus, voimakkuus ja lämpötila (*evaluation, excitement, forcefulness, and temperature*) (Environmental Simulation, s. 176).

Ennustetusti lämpötilatekijä aiheutti suurimman yhteisvaihtelun värisävyn muutoksen kanssa. Lämpimimmät olivat keltainen, punainen ja kelta-punainen väri ja viileimmät olivat siniset ja sinivihreät kohdat. Kaikki sininen arvosteltiin viileäksi riippumatta kromaattisesta voimakkuudesta. Toisessa kokeessa Hogg (1979), käytti värimerkkejä ja kolmiulotteista sisätilaa stimuloivaa pienoismallia, tunnistamaan emotionaalisen sävytekijän sekä värimerkeistä että sisätilasta. Todettiin, että värit laskivat emotionaalista sävyä (eli niistä tuli viilennin) ympäri värisävy-ympyrää punaisesta violettiin. Vähentämällä kromaattista voimakkuutta parannetaan tätä vaikutusta (Environmental Simulation, s. 176).

Hyvin harvoissa tutkimuksissa on käytetty täysimittaista tilaa ja riittävää aikaa. Mahdollisuus syntyi kuitenkin osana ympäristö-psykologian opetusta (Oxford School of Architecture). Tutkimuksena arvioitiin kahta lähes identtistä seminaaritilaa, joista toinen oli maalattu punaiseksi ja toinen siniseksi, sekä neljää aulaa läheisessä talossa. Aulat olivat identtisiä väritystä lukuun ottamatta. Näitä tutkimuksia toistettiin yli 10 vuoden ajan ja mukana oli yli 500 osallistujaa, pääasiassa arkkitehtiopiskelijoita, mutta myös pieniä ryhmiä maallikoita. Näissä pitkittäistutkimuksissa saatiin lisätukea väri-lämpö hypoteesille kognitiivisella tasolla. Tutkimuksessa arvioitiin värillisen pinnan aiheuttamaa tuntemusta. Punainen arvioitiin koko ajan lämpimäksi ja sininen viileäksi (Environmental Simulation, s. 177).

Väri-lämpö hypoteesi tarkoittaa termisen lämpötilan kokemista lämpimänä lämpimillä väreillä esim. punainen ja viileänä viileillä väreillä esim. sininen.

### 2.2.2 Ympäristön lämpötila

Ovatko todisteet puolueettomista tutkimuksista kelvollisia? Kokeet yrittivät mitata käyttäytymistä tai fysiologisia vaikutuksia, joita lämpimät ja viileät värit aiheuttavat. Usko väri-lämpö hypoteesiin tuntuu olevan vahva. Yksi noteerattu koe osoitti eroa 3 °C - 4 °C. Kokeessa syntyi omakohtainen tunne lämmöstä tai kylmästä, kun ensimmäinen työhuone oli maalattu sinivihreäksi ja toinen oli maalattu punaisella ja oranssilla (1961). (Environmental Simulation, s. 177).

Toinen mainittu esimerkki oli tehtaan kahvilan valaistuksesta. Tehtaan kahvilan siniset seinät aiheuttivat viluntunteita työntekijöillä, lämpötilan ollessa 22 °C. Lämpötilaa nostettiin 24 °C, valitukset jatkuivat edelleen. Seinät maalattiin oranssilla, jolloin lämpötila tuntui liian kuumalta 24 °C, joten lämpötilaa alennettiin 22 °C (Environmental Simulation, s. 177).

Näiden tutkimusten tulosten perusteella annetaan tavanomaista ohjeistusta käyttää viileitä värejä paikoissa, joissa ihmiset altistuvat korkeille lämpötiloille ja päinvastoin. Kuitenkin lämpöviihtyvyys saa paljon vähemmän vakuuttavia piirteitä, kun tarkastellaan nykyisten kokeellisten tutkimusten tulokset (Environmental Simulation, s. 177).

Nykyisillä kokeellisilla tuloksilla tarkoitetaan Lundin 1989 tutkimusta.

Berry (1961) suoritti kokeen, jossa huone oli maalattu valkoiseksi ja mitoitettiin 1,2 x 3 m viistolla katolla. Huoneessa oli viisi eriväristä loisteputkea ja väri-lämpötila oli muunneltavissa suotimen avulla. Ilmastointi piti ympäristön lämpötilan 22 °C ja 50 % suhteellisessa kosteudessa. Huoneessa pystyttiin muuttamaan lämpötilaa yhdessä minuutissa yksi °C ja lämmitys oli toteutettu lämpöpuhaltimella. Kokeen toteutus oli sellainen, että testihenkilöt eivät tulleet kokeellisen kiinnostuksen kohdistuvan väri-lämpö hypoteesiin. Koko koe kesti 90 minuuttia ja testin kesto yhdellä värillä vaihteli neljästä 29 minuuttiin. Koehenkilöille kerrottiin, että valot tuottavat huomattavasti lämpöä ja sen vuoksi pyydettiin painamaan nappia kun lämpötila nousi pisteeseen, jossa he alkoivat tuntea epämiellyttävää lämpöä. Analysoitaessa tuloksia, Berry ei havainnut huomattavia eroja epämukavuudessa viidellä eri värillä. Keskiarvo tasoilla lämpötilat olivat: valkoinen 26,9 °C, vihreä 27,2 °C, keltainen 27,3 °C, sininen 27,4 °C ja meripihka 27,6 °C (Environmental Simulation, s. 178).

Bennett ja Rey (1972) pyysivät koehenkilöitä arvioimaan lämpöviihtyvyyttä. Samassa arvioinnissa oli käytössä vuorotellen punaista, sinistä ja kirkasta suojalasiasia kolmena 20 minuutin istuntona sääkaapissa (3,6 x 7,2 x 3,4 m), jossa seinälämpötilaa vaihdeltiin välillä noin 16 °C-38 °C. Värisävy ei tuottanut havaittavaa vaikutusta lämpöviihtyvyyden arvioissa. Johtopäätöksenä oli, että värisävy tuottaa henkisen (*intellectual*) vaikutuksen siitä, että yksi väri on lämpimämpi tai kylmempi, mutta ei vaikuta lämpöviihtyvyyden sinänsä (Environmental Simulation, s. 178).

Fanger (1977) suoritti kokeen, joka kesti kaksi ja puoli tuntia. Koehenkilöt altistettiin punaiselle tai siniselle valolle. Tilan mitat olivat 6,0 x 4,7 x 2,5 m. Värillinen valo muodostettiin sinisillä loistelamppuvalaisimilla (150 luksia) tai punaista läpinäkyvää muovikalvoa suotimena käyttäen, jossa loistelamput (190 luksia). Lisättiin myös kaksi eri melutasoa (40 dB tai 85 dB). Kukin koehenkilö altistui näihin neljään koeyhdistelmään, neljässä erillisessä mukavuuskokeessa. Ensisijainen lämpötila määritettiin kullekin koehenkilölle, säätämällä lämpötilaa kymmenen minuutin välein, ottaen huomioon koehenkilöiden toiveet. Lämpötila säädettiin koehenkilölle optimiksi. (Environmental Simulation, s. 178).

Fysiologiset mittaukset toteutettiin 14 termistorilla, jotka olivat teipattu kiinni ihoon. Rektaalilämpötila mitattiin taipuisalla rektaalian turilla. Painon putoaminen kokeen aikana oli myös huomioitu. Koehenkilöitä pyydettiin lukemaan kokeen aikana ja heille ei ilmoitettu kokeen todellista tarkoitusta. Keskimäärin koehenkilöt halusivat noin 0,4 °C korkeamman ympäristön lämpötilan sinisessä kuin punaisessa valossa ( $p < 0,05$ ). Mitään merkittäviä eroja ei löytynyt fysiologisessa mittauksessa. Melutaso ei vaikuttanut ympäristön lämpötilaa paremmin koehenkilöihin, eikä se vaikuttanut fysiologisiin muutuksiin (Environmental Simulation, s. 178).

Green ja Bell 1980 maalasivat laboratorion seinät punaiseksi, siniseksi, ja valkoiseksi. Koehenkilöt testattiin yhdistelmällä, jossa on yksi väri ja neljä huonelämpötilaa (18 °C, 22 °C, 29 °C ja 35 °C). Koehenkilöt istuivat kolmiossa koetilassa, joko punaista, sinistä tai valkoista seinää vasten (1 x 1,1 m). Kukin testi kesti 20 minuuttia. Testin aikana testihenkilöltä pyydettiin arvio huoneenlämmöstä kolme kertaa Fahrenheit asteina. Sykettä seurattiin jatkuvasti valosähköisen pulssianturin avulla sormesta. Tulokset osoittivat, että terminen lämpötila vaikuttaa henkilökohtaiseen mukavuuteen ja koettuun lämpötilaan. Korkeammat lämpötilat huonontavat mukavuutta ja viihtyisyyttä sekä koehenkilöistä tuntuu lämpötila hallitsevan liikaa ympäristöä. Väri vaikutti koettuun ympäristöön, mutta sillä ei ollut vaikutusta arvioon huoneenlämmöstä eikä koehenkilöiden pulssiin. (Environmental Simulation, s. 179).

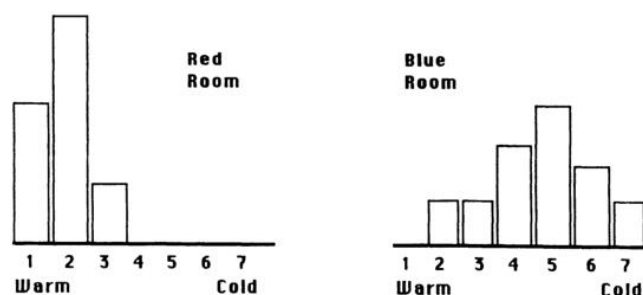
Edelliset neljä laboratoriotutkimusta ovat enemmän tai vähemmän onnistuneet tuottamaan uskottavuutta väri-lämpö hypoteesille. Green & Bell 1980 ehdotti, että energian säästöä pitäisi etsiä muualta kuin väri-lämpö hypoteesista. Fanger 1977 totesi, että 0,4 °C (keskimäärin koehenkilöt halusivat noin 0,4 °C korkeamman ympäristön lämpötilan sinisessä kuin punaisessa valossa), vaikka se oli melkein tilastollisesti merkitsevä, ei sillä ole mitään käytännön merkitystä (Environmental Simulation, s. 179).

Yksi tavoite toisessa Lundin tutkimuksessa oli testata väri-lämpö hypoteesia sisällä realistisessa ja täysimittaisessa tilassa. Kuten edellä oli mainittu, yksi huone oli maalattu punaiseksi ja toinen siniseksi. Erityistä huomiota kiinnitettiin sisätilojen suunnitteluun, jotta ne näyttäisivät kotoisilta. Kuvia, verhot, listat, nauhat ja matot otettiin käyttöön. Huoneeseen tullessa osa huoneesta oli maalaamatta (pohjan väriä ei mainittu tutkimuksessa), tällä pyrittiin vakaampaan värivaikutukseen. Koehenkilöt voisivat visuaalisesti tutustua tutkimustilaan, kunnes he ovat tyytyväisiä sisustukseen. Lisäksi pidettiin tärkeänä tutkia väri-lämpö hypoteesin koeaikaa. Tämä tehtiin kahdella eri tavalla (Environmental Simulation, s. 179).



Ensin, kutakin koehenkilöä pyydettiin arvioimaan lämpötila ensimmäisen ja toisen tunnin aikana, testi oli kahden tunnin kokeilu. Toisessa samoja aiheita testattiin koetilassa yhden viikon aikajänteellä. Todellinen lämpötila oli huoneissa keskimäärin 22,2 °C, mutta tietty satunnaisvaihtelu otettiin huomioon koeasetelman suunnittelussa. Koehenkilöitä pyydettiin kaiuttimen avulla arvioimaan huoneen lämpötila 20 minuuttia ja jälleen 90 minuuttia kokeen alusta. Lämpötila-arvioita tehtiin välillä 15 °C-30 °C. Lisäksi koehenkilöiltä, pyydettiin lämpötilan lisäksi arvioimaan värit kahdesta huoneesta semanttisen asteikkojen avulla ja kirjoittamaan arvio jokaisesta huoneesta (kuva 3) (Environmental Simulation, s. 179).

Kuten oli odotettavissa, suuria eroja saatiin punaisen ja sinisen tilan vertailussa semanttisella asteikolla yllä olevassa kuvassa. Tämä havainto tukee koehenkilöiden omia kommentteja avoimeen loppukysymykseen, niissä oli kuvattu punainen huone lämpimäksi ja pehmeäksi, kun taas sininen huone oli viileä, raikas ja puhdas. Jotta voitaisiin edelleen analysoida lämpötiloja, tiedot indeksoitiin jakamalla arvioitu lämpötila todellisella lämpötilalla. Siten todellista lämpötilaa suurempi luku merkitsee yliarvioimista, kun taas pienempi luku merkitsee aliarvioimista. Tiedot muunnokset oli myös suoritettava, jotta saadaan lineaarinen parametri, jota voidaan käyttää tilastoanalyysiin. Kuitenkin, jotta tulokset olisivat mielekkäämpiä lukijalle, todellinen ja arvioitu lämpötila annetaan Celsius-asteilla taulukossa 1 (Environmental Simulation, s. 180).



**Kuva 3.** Vastauksena vaihtelu semanttisessa kyselyssä lämmin / kylmä skaalattu punaiseen ja siniseen huoneeseen (Environmental Simulation, s. 180).

Sopii hyvin todelliseen ja arvioituun lämpötilaan sekä huoneisiin (punainen huone  $r = 0,88$  ja sininen huone  $r = 0,78$ ,  $p < .01$ ). Kuten voidaan nähdä taulukosta 1, lämpötila oli yleisesti aliarvioitu. Huoneen väri ei kuitenkaan vaikuttanut yleiseen arvioon. Oikeastaan lämpötila-arvio laski ensimmäisestä toiseen tuntiin, riippumatta huoneen väristä. Tämä aliarviointi lämpötilassa toisen tunnin jälkeen tapahtui huolimatta siitä, että todellinen lämpötila nousi. Todennäköinen syy tähän oli koehenkilöiden istuminen pitkän aikaa, jolloin on taipumus tuntea kylmempää. Arvioitu lämpötila laski ensimmäisestä tilaisuudesta toiseen (viikko) kussakin värissä, lasku oli hieman suurempaa sinisessä huoneessa. (Environmental Simulation, s. 180).

Oikeastaan, suurin arvioitu lämpötila kirjattiin sinisessä huoneessa ensimmäisen tunnin aikana ensimmäisellä kerralla, kun taas alin arvio oli sinisessä huoneessa toisella tunnilla toisella kertaa. Tämä voi selittyä ajatuksella, että kun koehenkilöitä tuli viileään siniseen ilmastoituun huoneeseen syntyi miellelyhtymä, siellä ei ollut oikeastaan kylmä. Sen sijaan, siellä on ehkä lämpimämpi kuin se "näytti" ja sen seurauksena he yliarvioivat lämpötilan. (Vertaa koko/paino illuusio). Tämä alustava vaikutus saattaa olla haalistunut pois ja koska koehenkilöt istuivat vielä kaksi tuntia, he alkoivat tuntea kylmempää, jolloin pitkäaikainen miellelyhtymä "sininen kylmää" tuli takaisin ja huone alkoi tuntua kylmemmältä (Environmental Simulation, s. 181).

**Taulukko 1. Todelliset ja arvioidut lämpötilat Celsiusasteina, punainen ja sininen huone (Environmental Simulation, s. 180).**

Room color <sup>a</sup>	Time	Real temp	Total	Estimated temp	Total
Red	First hour	21.9	22.1	21.6	21.1
	Second hour	22.3		20.8	
Blue	First hour	22.1	22.3	21.9	21.5
	Second hour	22.5		21.2	

### 2.2.3 Yhteys kaksitasoiseen värilämpö hypoteesiin

Huolimatta parannuksista koesuunnittelussa (Lund) viimeinen tutkimus ei tue edelleenkaan olemassa olevaa yleistä korrelaatiota huoneen "väri" ja lämpöviihtyvyyden välillä. Värilämpö hypoteesin ytimessä on eroa kognitiivisella tasolla ja toisaalta viihtyvyyden tasolla. Ei voi olla epäilystäkään siitä, että ihmisten ajatuksissa lämpimät ja viileät värit mielletään heidän kokemustensa kautta täysimittaisessa ympäristössä. Tämä oli kirjattu empiirisessä muodossa, vaikka tulokset tukevat järjestelmällistä havaintoa tutkimuksissa. Kokeita ei ole tehty tiukoissa laboratorio-olosuhteissa. Kuitenkin erilaista aineistoa on esitetty. Aineisto on kerätty epämukavuusindekseillä, mukavuusluokituksilla, säädöillä ja mittausdatasta. Mittausdata on kerätty termistoreilla ja antureilla, jotka ovat kiinnitetty kehoon. (Environmental Simulation, s. 181).

## 2.3 Autonominen vireystilan ja mielialan muutos

Gerard (1958) osoitti ensimmäisenä, että punaiset ja siniset valot vastakkaisissa päissä spektriä aiheuttavat eri aivokuoren osien kiihottumisen. Mittaukset luokiteltiin suoraan alfa pitoisuudesta ja alfa amplitudista (Environmental Simulation, s. 181).

Ali (1972) havaitsi edelleen todisteita Gerardin havainnoista. Mittaamalla aivokuoren kiihottumisen välillisesti ja sopeutettuaan tulokset, hän havaitsi alfan erilaisen palautumisen punaisesta ja sinisestä valosta. Caldwell ja Jones (1985) käyttivät kolmea indeksiä aivokuoren kiihottumisen mittaamiseen (alfa-aktiivisuus pitoisuus, huippu EEG taajuus ja teho spektrianalyysi) eivätkä löytäneet tällaisia eroja punaisen ja sinisen valon väliltä. Heidän koehenkilönsä olivat kuitenkin alttiina vain 45 sekuntia, verrattuna Gerardin käyttämään 10 minuutin väliin tai Alin käyttämään kuuden minuutin jaksoon (Environmental Simulation, s. 182).

Analogisen tehoanalyysin avulla Küller osoitti eron alfassa todellisten huoneiden välillä, jotka olivat maalattu elävästi harmaan sävyillä, vastaavasti koeaika oli kolme tuntia (Environmental Simulation, s. 182).

Erot aivokuoren kiihottumiseen saatiin myös tutkimuksessa Mikellides (1989). Enemmän delta ja alfa-aaltoja havaittiin sinisessä huoneessa, joka osoittaa rentoutumisen tilaa ja uneliaisuutta verrattuna punaiseen huoneeseen, sekä ensimmäisellä että toisella tunnilla altistumista, mutta etenkin testin toisella tunnilla. Sitä ei ollut osoitettu ennen, että väristimulaatio voi vaikuttaa delta rytmiin ja sellaisena se on uusi havainto. Kiinnostusta herätti lisätä delta mukaan myöhempiin tutkimuksiin, joissa testattaisiin edelleen herkkyyttä tämän taajuuden väristimulaatioon. Sen sijaan, miksei käytetä betaa, jos on herkkä väreille (Environmental Simulation, s. 182).

Tutkimuksissa on ollut myös eroja elektrodien sijoittamisessa päänahkaan. Joissakin tutkimuksissa esim. Gerard (1958), elektrodit oli sijoitettu takaraivon alueen yli kalloon, nämä elektrodit todennäköisesti vastaavat välittömästi visuaaliseen stimulaatioon. Lundin tutkimuksissa 1976, 1986 ja 1989 elektrodit olivat sen sijaan sijoitettu paljon ylemmäksi päänahkaan keskitetysti ja seinämänmyötäisesti. Koe tulee todennäköisesti vastaamaan yleisempää kiihottumisen tasoa, aistien koko aivokuorta, joka voi olla parempi havainto ylikuormituksesta ja stressistä (Environmental Simulation, s. 182).

Yksikään laboratoriotutkimuksista tähän mennessä ei ole löytänyt mitään merkittäviä tuloksia suositusta oletuksesta, että syke olisi suurempi punaista katsottaessa, kuin sinistä katsottaessa. Gerardin tutkimuksessa syke oli aluksi korkeampi punaisella kuin sinisellä valolla, mutta viimeisen kahden minuutin aikana ero tuli päinvastaiseksi. Mikellides totesi sykkeen olevan korkeampi sinisessä huoneessa kuin punaisessa. Siksi pätevyys mitata sykkeellä autonominen vireystila kyseenalaistetaan (Environmental Simulation, s. 182).

Küllerin muotoilema vaihtoehtoinen hypoteesi (1976), joka perustuu aikaisempiin tutkimuksiin, näyttää selittävän tuloksia paremmin. Huomiota herättävän ympäristön aikaansaama aivokuoren vireystilan muutos voi liittyä sydämen sykkeen hidastuvuuteen (Environmental Simulation, s. 182).

## **2.4 Uudemmat väritutkimukset**

### **2.4.1 Näet punaista, tunnet lämmintä?**

Tutkimus osoittaa että voidaan säästää energiaa toimiston valaistuksessa muuttamalla värilämpötilaa. Hiljattain 28. kansainvälinen kongressi soveltavan psykologian alalta (ICAP 2014) Pariisissa. Työtä esitteli joukko tutkijoita University College Londonista. Osana yhteistä tutkimusta UCL:n Energy Instituten ja Ciscn kanssa, tutkimuksessa tarkastellaan, hahmotammeko huoneenlämmön eri tavalla riippuen huoneen valaistuksesta (Gesche Huebner et al. , 2014).

Nähdään punainen, tulee lämmin olo. Valaistuksen vaikutuksesta lämpöviihtyvyyteen saatiin tuloksia, joka todistaa hypoteesia, että punainen valo tuntuu meistä lämpimämmältä ja sininen valo tuntuu meistä kylmemmältä (ns. väri-lämpö hypoteesi). Tutkimus osoittaa, että älykäs LED-valaistus voi olla tehokas keino säästää energiaa rakennuksissa (Gesche Huebner et al. , 2014).

Väri-lämpö hypoteesissa todetaan, että punertava valo koetaan suhteellisesti lämpimäksi ja sinertävä valo viileäksi. Sinertävämmän määrän vs. punertavamman määrä voidaan kuvata ekvivalentisella värilämpötilalla (*CCT*). *CCT* on alhainen lämpimässä punertavassa värissä (2700-3000 K) ja korkea kylmissä sinertävissä väreissä (>5000 K) (Gesche Huebner et al. , 2014).

Hypoteesia hyödynnetään ympäristön manipulointiin keinovalolla. Tämä voisi olla tehokas työkalu energiansäästöön rakennuksissa. Lämpötila voidaan laskea alemmaksi punertavalla valolla lämmityskauden aikana. Kesällä ilmastoiduissa rakennuksissa voidaan käyttää sinertävää valoa, jolloin tarve laskea huoneenlämmöä ei olisi niin suuri (Gesche Huebner et al. , 2014).

Jopa tilapäinen vaikutus voi osoittautua hyödylliseksi tehontarpeen hallinnassa rakennuksissa. Kuitenkin aiempien tutkimusten tulokset ovat epäjohtamukaisia eivätkä salli lopullisten päätelmien tekemistä. Siksi tässä tutkimuksessa testattiin väri-lämpö hypoteesi kokeellisesti valvotuissa olosuhteissa (Gesche Huebner et al. , 2014). Testaus suoritettiin suljetussa mittaustilassa. Mittaustilassa ympäristön lämpötila ja suhteellinen kosteus on kontrolloitavissa. LED-valaistus asennettiin mittaustilaan, jota voidaan valaista eri värilämpötiloilla. Muita tekijöitä, jotka vaikuttavat lämpöviihtyvyyden, kuten vaatteita ja aktiviteettitasoa kontrolloitiin (Gesche Huebner et al. , 2014).

Ensimmäisessä tutkimuksessa, ympäristön lämpötila mittaustilassa supistui jatkuvasti 24 °C:sta 20 °C:een, 60 minuutin ajan. Joka kymmenes minuutti osallistujat arvostelivat lämpöviihtyvyyttä tavallisella tutkimusasteikolla (ISO 10551) (Gesche Huebner et al. , 2014).

Ensimmäisessä ryhmässä oli 16 osallistujaa altistunut 2700 K värilämpötilalle. Toisessa ryhmässä oli 16 osallistujaa altistunut 6500 K värilämpötilalle. Tulokset osoittivat, että lämpöviihtyvyysarvot arvioitiin korkeammalle punertavassa valaistuksessa värilämpötilan ollessa 2700 K, kuin sinertävän värilämpötilan ollessa 6500 K. Tämä ero oli erityisen korostunut lämpötiloissa noin 21 °C ja 22 °C (Gesche Huebner et al. , 2014).

Tutkimuksessa kaksi, käytettiin samaa mittaustilaa. Kokeessa käytettiin kolmea eri värilämpötilaa (2700 K, 4440 K, 6500 K). Alustavat tulokset olivat samanlaisia kuin ensimmäisessä tutkimuksessa. Lämpöviihtyvyyden arvot olivat korkeammat keskimmaisella värilämpötilalla 4400 K kuin 2700 K, mutta huonommat arvosanat kuin 6500 K (Gesche Huebner et al. , 2014).

Meidän tutkimukset tukevat väri-lämpö hypoteesia. Vaihtelevalla ympäristön valolla on vaikutusta lämpöviihtyvyyden, ja siten se voi olla sopiva väline energiansäästöön ja vähentää huipputehon tarvetta (Gesche Huebner et al. , 2014).

#### **2.4.2 Ympäristön lämpötilan ja valonlähteen vaikutus näkömukavuuteen**

Viihtyisä toimisto perustuu neljään keskeiseen ympäristötekijään, joita ovat ilmanlaatu, kosteus- ja lämpötilaparametrit, akustiikka ja visuaalisuus. Maailmanlaajuisesti mukavuuden laatu määritellään jokaisella edellä mainitulla komponentilla. Vaikka koehenkilöillä kunkin tekijän mukavuus on suhteellisen hyvin tiedossa, tällä hetkellä ei voida päätellä kokonaisvaikutusta. Yhteisvaikutukset tulee tutkia ainakin kahdella tekijällä (C Laurentin et al. , 2000).

Nykyään visuaalinen mukavuus on määritelty tietyillä kriteereillä suositeltaville tasoille esim. valaistusvoimakkuudet. Kuitenkin nämä kriteerit on johdettu empiirisissä tutkimuksissa, jossa ympäristön parametrit kuvaavat muunlaista mukavuutta, esim. lämpöä, akustiikkaa tai hajua, joita ei ole pidetty vakiona tai kontrolloitu. Koehenkilöinä on ollut valaistusalan ammattilaisia ja maallikoita, heiltä saatiin tietoja että koehenkilöiden arvioima optimaalinen valaistus voi riippua lämpötilasta tai vuodenajasta (C Laurentin et al. , 2000).

Kesällä ammattilaiset ovat havainneet, että toimistotyöntekijät kokevat korkean lämpötilan matalammaksi, kun toimiston verhot ovat kiinni. Tämä osoittaa hämäryyden viittaavan symbolisesti viileyteen ja mahdolliset lisätutkimukset kulttuurin vaikutuksesta, lämpötilasta, vuodenajasta ja muista tekijöistä ovat tarpeen (C Laurentin et al. , 2000).

Kokeessa tutkittiin lämpö-olosuhteiden vaikutusta valaistuksen tasoon. Koska tämä vaikutus riippuu paljon valaistuksen tyypistä, käytetään kolmea valonlähdetyyppiä luonnollista, keinotekkoista ja yhdistettyä (50 % luonnonvalo, 50 % keinovalo). Yleensä ohjausjärjestelmät säästävät energiaa säilyttäen vakiovalaistusvoimakkuuden työpaikoilla. Kuitenkin useimmat kokeet visuaalisesta mieltymyksestä ja visuaalisesta mukavuudesta ovat osoittaneet standardin mukaisen vakiovalaistusvoimakkuuden olevan useille työntekijöille riittämätön. Lämpö-olosuhteiden vaikutusta visuaaliseen suorituskyykyyn ei ole tutkittu. (C Laurentin et al. , 2000).

Hypoteesista halusimme testata, että termisillä olosuhteilla ja valonlähteen tyypillä on vaikutusta visuaalisen mukavuuden arviointiin. Jos tämä pystytään osoittamaan, säätöjärjestelmiä tulee lisätä käyttäjien tyytyväisyyttä ja energian säästöä lisäämään (C Laurentin et al. , 2000).

Koehenkilöinä olivat 20 oppilasta (12 miestä ja 8 naista), joiden ikä oli 20 - 30 vuotta. Kaikki osallistujat olivat itse ilmoittaneet näön ja värinäön olevan normaali. Kokeilu tapahtui kahdessa samanlaisessa testihuoneessa. Huoneet olivat 2,3 m leveä, 6,7 m pitkä ja 2,5 m korkea. Huone oli jaettu kahtia väliseinällä pituussuuntaan ja huoneessa oli kaksinkertaiset läpinäkyvät ikkunat itä-seinällä. Huoneen seinäväri oli beige ja heijastuskerroin oli 0,80 (C Laurentin et al. , 2000).

Katto oli rakennettu valkoisista kuitulevyistä, heijastuskerroin oli 0,81. Lattia oli sininen matta ja heijastuskerroin oli 0,39. Jokaisessa huoneessa oli kolme samanlaista vierekkäistä työpöytää, jotka olivat ruskeaa puuta ja heijastuskerroin oli 0,40. Tilan keskellä voitiin testata yksi koehenkilö, muut koehenkilöt esivalmisteltiin testipaikan ulkopuolella. 30 koehenkilöä työskenteli tietokoneella ja heidän sijaintiaan vaihdeltiin, jotta etäisyys ikkunasta ja näin päivänvalon määrä muuttuisi (C Laurentin et al. , 2000).

Havaittiin, että koko valaistuksen (päivänvalo ja keinovalaistus) valinta riippui päivänvalon määrästä. Korkea valaistusvoimakkuustaso valittiin lähellä ikkunaa, taso oli identtinen suositusten kanssa sijainnilla keskellä huonetta (työpaikka) ja alhainen kaukana ikkunasta. Tämä koe osoitti, että sijainnilla huoneessa on suuri vaikutus visuaaliseen mieltymykseen. Tämän vuoksi kokeessa sijainti ja valaistus säilyi muuttumattomana koko tutkimuksen ajan (C Laurentin et al. , 2000).

Työpaikka oli valaistu kahdella loistelampulla ja kahdella *wall washerilla*, jotka on varustettu yhdellä 55 W energiansäästölampulla (*CCT* 4000 K, *CRI* 85), jotka voidaan erikseen himmentää (1 % - 100 %). Päivänvalo säädettiin säleverhoilla. Jokainen säleverho ja jokainen valaisin voitiin ohjata manuaalisesti tai automaattisesti. Automatiikka oli toteutettu tietokoneella, anturina valokenno. Näitä kennoja käytettiin horisontaalisen valaistusvoimakkuuden seurantaan koehenkilöillä visuaalisissa tehtävissä (C Laurentin et al. , 2000).

Testihuoneen lämpötila oli säädettävissä  $\pm 0,5$  °C. Kosteutta ei ohjattu, vaan seurattiin jatkuvasti ja se pysyi suhteellisen vakiona kussakin sessiossa. Koehenkilöt pukivat päälle vaatteet, jossa heillä oli lämpöneutraali tunne. Ilmankosteus pysyi lähes samana koko kokeen ajan (30 %) (C Laurentin et al. , 2000).

Tilastollisesti merkittäviä vaikutuksia löytyi päivänvalo-olosuhteista ja visuaalisen ympäristön kokemisesta, mutta vain miehillä. Naisten koettu visuaalinen ympäristö oli hyvin tumma (keskiarvo vastaukset semanttisen mittakaavassa 0,37, vakio poikkeama  $\pm 0,09$ ) riippumatta oliko kirkasta vai pilvistä. Miehet eivät kokeneet ympäristöä tummana eivätkä kirkkaana päivänvalossa, taivaan ollessa pilvinen, ympäristö koettiin tummana (C Laurentin et al. , 2000).

Toiseksi tilastollisesti merkitsevä oli lämpötilan vaikutus visuaalisen ympäristön miellyttävyyteen, mutta vain naisilla. Miehet eivät kokeneet visuaalista ympäristöä epämiellyttäväksi eikä miellyttäväksi. Naiset kokivat visuaalisen ympäristön hyvin epämiellyttäväksi. Näiden kahden tuloksen perusteella voidaan olettaa, että naiset olisivat herkempiä termisille olosuhteille, kun terminen ympäristö on mitoitettu epämiellyttäväksi ja visuaalinen ympäristö on myös mitoitettu epämiellyttäväksi, kun taas miehet olivat herkempiä päivänvalossa (C Laurentin et al. , 2000).

### 3 VTT-lämpöaistimusmalli

#### 3.1 Ihmisen yksilöllisten ominaisuuksien vaikutus lämpöaistimukseen

Koska ihmiset viettävät kehittyneissä maissa noin 90 % ajastaan sisätiloissa, on tärkeää pystyä arvioimaan erilaisten käyttäjäryhmien lämpöaistimuksia riittävällä luotettavuudella. Eri käyttäjäryhmien yksilöllisiä lämpöaistimuksia voidaan arvioida VTT:llä kehitetyllä lämpöaistimusmallilla. Tämä ihmisen anatomiaan ja fysiologiaan perustuva malli mahdollistaa ihmisen yksilöllisten ominaisuuksien (sukupuoli, ikä, painoindeksi ja lihaksikkuus) vaikutusten arvioinnin ihmisen eri kudostyyppien (luu, lihas, rasva ja iho) määriin. Kudostyyppien riittävän tarkka tunnistaminen on tärkeää siksi, että esimerkiksi levossa oleva lihaskudos tuottaa perusaineenvaihdunnalla 0,67 W/kg lämpöä kun rasvakudoksen lämmöntuotto on 0,004 W/kg (Tuomaala, Holopainen, 2014).

Rakennusten energiatehokkuuden jatkuva parantaminen näyttää olevan yksi lähitulevaisuuden vahva kehitystrendi. Samaan aikaan ihmiset viettävät kehittyneissä maissa pitkiä aikoja sisätiloissa, ja tehtyjen kyselyjen mukaan yksi keskeinen sisäympäristön laatuun vaikuttava tekijä on ihmisten kokemat lämpöaistimukset. Näistä lähtökohdista on tärkeää pystyä arvioimaan erilaisten käyttäjäryhmien lämpöaistimuksia riittävän luotettavasti niin, että oikeilla suunnittelu- ja rakennusten ylläpitotratkaisuilla voidaan varmistaa sekä rakennusten energiatehokkuus että tilojen loppukäyttäjien tyytyväisyys lämpöolosuhteisiin (Tuomaala, Holopainen, 2014).

Arvioitaessa ihmisen yksilöllisten ominaisuuksien (sukupuoli, ikä, painoindeksi ja lihaksikkuus) vaikutuksia lämpöaistimukseen, kyseisiä suureita oli varioitu systemaattisesti. Kaikissa laskentatapauksissa miesten pituudeksi oli valittu 175 cm ja naisten pituudeksi 162 cm. Molemmille sukupuolille painoindeksiä oli varioitu lukuarvoilla 20, 25 ja 30; iäksi oli annettu 20 vuotta, 50 vuotta ja 80 vuotta sekä lihaksikkuuksi oli valittu kolme lukuarvoa 0 (minimi), 0,5 (keskiarvo) ja 1 (maksimi) (Tuomaala, Holopainen, 2014).

Näissä yksittäisissä laskentatapauksissa kaikki muut lämpöaistimukseen vaikuttavat sisäiset (ihmiseen liittyvät) reunaehdot on pidetty vakioina. Vaatetuksen lämmöneristävyys oli oletettu 0,86 clo, ja aktiivisuustasoksi oli valittu normaalia toimistotyön aktiivisuutta vastaava 1,2 MET (70 W/m<sup>2</sup>). Sisäilman virtausnopeudeksi oli valittu alle 0,10 m/s, jolloin voitiin käyttää aikaisemman kokeellisen tutkimuksen määritettyjä kehon osien paikallisia lämmönsiirtokertoimia, joiden lukuarvot olivat välillä 2,8 W/(m<sup>2</sup> K) ... 4,5 W/(m<sup>2</sup> K) (Tuomaala, Holopainen, 2014).

Ihmisen lämpöviihtyvyyteen vaikuttavat ulkoiset (tilaan liittyvät) reunaehdot ovat tässä tutkimuksessa niin ikään vakioitu kaikissa tehdyissä laskentatapauksissa. Selvyiden vuoksi tilassa on oletettu tasapainotilan olosuhteet niin, että ilman ja tilan kaikkien sisäpintojen lämpötilat ovat 22 °C, ilman suhteellinen kosteus on 40 % ja kaikkien pintojen emissiviteettien lukuarvo on 0,9 (Tuomaala, Holopainen, 2014).

Teknologian tutkimuskeskus VTT:ssä ihmisen lämpöaistimusten arviointiin on kehitetty menetelmä (Human Thermal Model, HTM) perustuu ihmisen anatomian ja fysiologian mallintamiseen. Anatomian osalta ihminen on jaettu 17 toisiinsa liittyvään kehonosaan (pää, kaula, olkavarret, kyynärvarret, kädet, selkä, rinta, lantio, reidet, sääret ja jalkaterät). Kukin kehonosa on edelleen jaettu saman keskeisiin sylintereihin, joiden kudosterroksina (sisältä ulospäin) ovat järjestyksessä luu, lihas, rasva ja iho (Tuomaala, Holopainen, 2014).

Poikkeuksen muodostaa pää, joka on estimoitu pallon muodolla kudosterroksina aivot, luu, lihas, rasva ja iho. Keskivartalon kehonosiin (rinta, selkä ja lantio) on lisätty sisäelimet luu- ja lihaskerrosten väliin. Fysiologiamallissa on otettu huomioon valtimo- ja laskimoverenkierron lisäksi hiusverenkierto, millä säädetään kehon sisäosien lämpötilaa eri kehonosien ihokudoksen verenkierron määrää muuttamalla. Fysiologiamallissa on mallinnettu myös hikoilu ja vilunväristykset kehon sisälämpötilan pitämiseksi halutuissa rajoissa myös ääriolosuhteissa (Tuomaala, Holopainen, 2014).

Ihmismallin ja ympäröivän tilan välisessä lämpö- ja kosteusteknisessä vuorovaikutuksessa huomioidaan ainakin ihmisen vaatetus. Vaatetus esitetään kehonosittain lämpövastuksina, jotta laskennassa voidaan määrittää kehon paikalliset pintalämpötilat. Näiden lämpötilojen avulla huomioidaan ihmisen ja ympäristön välisessä lämmönsiirrossa konvektio ilmaan ja nettosäteily tilan pintojen kanssa. Laskennassa huomioidaan lämmönsiirto ihmisen ihon ja tilan ilman vesihöyryn osapaine-erojen avulla (Tuomaala, Holopainen, 2014).

Keskimääräisen 72,3 kg painavan aikuisen miehen kehossa aivojen, sisäelinten ja keuhkojen painot ovat 1,4 kg, 11,6 kg ja 3,0 kg. Keskimääräisen miehen luuston ja ihon kokonaispainot ovat 13,1 kg ja 3,4 kg. Miehillä on keskimäärin 3 % enemmän luuta ja 1 % enemmän ihokudosta kuin naisilla. Näiden lähtötietojen pohjalta tutkimuksessa on estimoitu luuston ja ihon painoja seuraavien yhtälöiden avulla (Tuomaala, Holopainen, 2014):

$$Painoluu = paino[0,158 + (0,03 \cdot Sukupuoli)], ja \quad (1)$$

$$Painoiho = paino[0,0374 + (0,01 \cdot Sukupuoli)] \quad (2)$$

jossa paino on ihmisen kokonaispaino [kg] ja Sukupuoli on naisille 0 ja miehille 1.

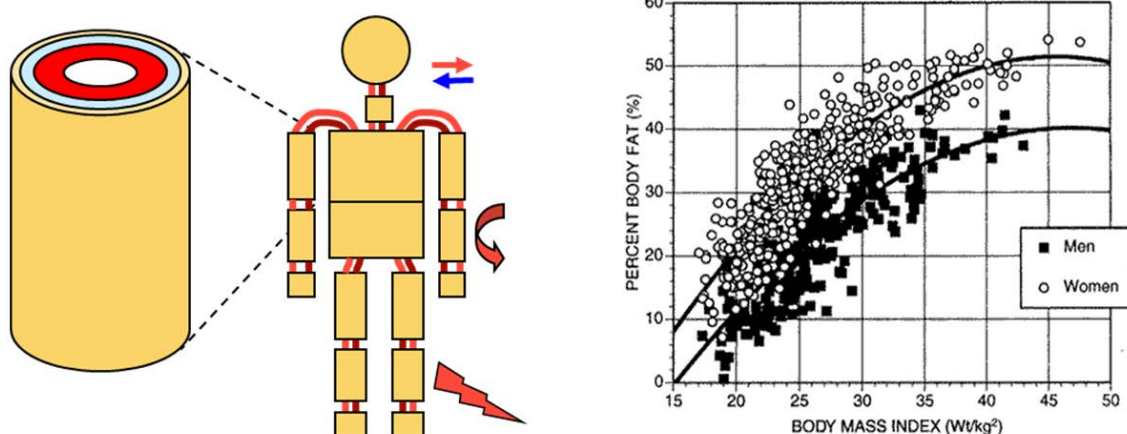
Useissa toisistaan riippumattomissa tutkimushankkeissa oli arvioitu painoindeksiin ja kehon kokonaisrasvaprosentin välistä riippuvuutta. Kuvassa 1 on esitetty yhden tällaisen tutkimuksen tuloksia erikseen miehille ja naisille. Naisten rasvaprosentti näyttää olevan keskimäärin 11 % korkeampi kuin miehillä. Ihmisen rasvaprosentti vaihtelee tämän tutkimuksen perusteella noin 11 % keskiarvojen molemmiin puolin (painoindeksiin ollessa vakio), mikä ilmeisesti riippuu ihmisen yksilöllisestä lihaksikkuudesta (yksilöllinen lihas- ja rasvakudoksen välinen suhde). Ihmisen iän on arvioitu vaikuttavan rasvaprosenttiin siten, että rasvaprosentti kasvaa 0,13...0,23 % vuodessa (Tuomaala, Holopainen, 2014).



Näiden lähtötietojen pohjalta ihmisen yksilöllistä rasvan määrää on arvioitu seuraavan yhtälön avulla:

$$\text{Painorasva} = \text{paino}[-0,0438 \cdot \text{BMI}^2 + 4,014 \cdot \text{BMI} - 10,75 \cdot \text{Sukupuoli} + 0,23 \cdot \text{Ikä} - 51,81 - 22,0 \cdot (\text{Lihaksikkuus} - 0,5)]/100 \quad (3)$$

jossa BMI on painoindeksi [kg/m<sup>2</sup>], Ikä on ihmisen ikä [vuosi] ja ihmisen yksilöllinen lihaksikkuus on keskimäärin 0,5 (minimi 0 ja maksimi 1) (Tuomaala, Holopainen, 2014).



Kuva 4. HTM anatomiamalli (vasemmalla) sekä painoindeksin ja rasvaprosentin väliset tilastolliset riippuvuudet (oikealla) (Tuomaala, Holopainen, 2014).

### 3.2 Termisellä ihmismallilla parempaan lämpöviihtyvyyteen

Lämpöviihtyvyyden laskentamenetelmänä on usein käytetty Fangerin PMV-menetelmää (*Predicted Mean Vote*). Ihmisen ja ympäristön väliseen lämpötaseeseen perustuva PMV-menetelmä jättää huomioimatta ihmisen oman lämmönsäätelymekanismien. Menetelmä pitää ihmistä passiivisena lämpöärsyksen vastaanottajana. Aiemmat tutkimukset osoittavat PMV-menetelmän progressiivisesti yliarvioivan koettua lämpötilaa lämpimissä olosuhteissa ja aliarvioivan sitä viileissä olosuhteissa. PMV-menetelmää tulee käyttää lämpöviihtyvyyden arviointiin vain hyvin rajallisissa olosuhteissa. Lämpöviihtyvyyden arvioimisen muuttuvissa olosuhteissa tulee ottaa huomioon ihmisen luontainen taipumus sopeutua muuttuviin ympäristöoloihin lämmönsäätelyjärjestelmän avulla (Holopainen, 2012).

PMV-menetelmä on indeksi, jolla skaalataan suuri joukko ihmisiä seitsemän portaisella arviointiasteikolla, joka perustuu ihmisen lämpötasapainoon kehossa. Lämpötasapainoa on tutkittu sisäisellä lämmöntuotolla kehossa. Kehon lämmöntuotto on yhtä suurta kuin kehosta ympäristöön häviävä lämpö. Keskinertaisessa ympäristössä ihmisen lämmönjakelujärjestelmä pyrkii automaattisesti muuntamaan ihon lämpötilan ja hien erityksen säilyttäen lämpötasapainon (ISO 7330, 2006).

PMV-menetelmä ennustaa termisen keskiarvon samassa ympäristöstä olevasta suuresta joukosta ihmisten mielipiteitä. Kuitenkin yksittäiset mielipiteet ovat hajallaan ympäri tätä keskiarvoa. On hyödyllistä pystyä ennustamaan ihmisten määrä, joiden mielipide on todennäköisesti epämiellyttävä tai kokevat todennäköisesti ympäristölämpötilan epämiellyttäväksi. (ISO 7330, 2006).

PPD on indeksi, joka muodostaa prosentuaalisen ennusteen lämpöön tyytymättömistä ihmisistä. Ihmiset tuntevat liian viileää tai liian lämmintä. Käyttötarkoitus kansainväliselle standardille on lämpöön tyytymättömien ihmisten mielipide arvioituna seitsemän portaisella arviointiasteikolla (ISO 7330, 2006).

PMV ja PPD ilmaisevat epämukavan lämpimän ja kylmän koko kehosta. Lämpötytymättömyys voi myös johtua ei halutusta jäähtymisestä tai lämpenemisestä yhdessä tietyssä kehon osassa. Tätä kutsutaan paikalliseksi epämukavuudeksi. Yleisin syy paikalliselle epämukavuudelle, on veto (tai ristiveto). Toinen paikallinen epämukavuuden aihe on liian suuri lämpötilaero pään ja nilkkojen välillä. Lämpötilaero aiheutuu liian lämpimästä tai liian kylmästä lattialta. Myös liian korkea epäsymmetria säteilevässä lämmössä aiheuttaa paikallisen epämukavuuden (ISO 7330, 2006).

Lämpöviihtyvyys on edellytys henkilön tyytyväisyydelle vallitseviin lämpöoloihin, joka ilmenee tyytyväisyytenä lämpöympäristöön. Tyytymättömyys voi johtua lämpimästä tai viileästä epämukavuudesta koko kehossa tai kehon osassa tämän ilmaisemiseen soveltuu PMV ja PPD (ISO 7330, 2006).

Yksilöllisistä eroista johtuen on mahdotonta määritellä terminen ympäristö, joka tyydyttää kaikkia. Aina tulee olemaan tietty prosenttiosuus tyytymättömiä henkilöitä, mutta on mahdollista määritellä ympäristöön ennustettu malli. (ISO 7330, 2006).

Usein samat henkilöt ovat herkkiä erilaisille paikallisille epämukavuuksille. Esimerkiksi sama henkilö voi olla herkkä paikallisille jäähtymisen aiheuttamalle säteily-epäsymmetrialle tai kylmälle lattialle. Kylmäherkkä ihminen voi myös helpommin kokea pientä epämukavuutta koko elimistössä. Tämän vuoksi muiden paikallisten epämukavuuksien määrää ei pidä lisätä (ISO 7330, 2006).

Termisillä ihmismalleilla on mallinnettavissa ihmisen lämpöfysiologinen ja -fysikaalinen toiminta sekä lämmönsäätelyjärjestelmä. Sadan viime vuoden aikana on suunniteltu kymmeniä erilaisia termisiä ihmismalleja. Näiden mallien hyödyntäminen käytännössä on ollut vähäistä mallien monimutkaisuuden vuoksi (Holopainen, 2012).

Tästä johtuen on kehitetty HTM-malli (*Human Thermal Model*), jota voidaan käyttää lämpöviihtyvyyden laskentaan sekä pysyvissä että muuttuvissa olosuhteissa. HTM-malli perustuu ihmisvartalon todelliseen anatomiaan ja fysiologiaan. Malli on osa dynaamista rakennuksen energialaskentaohjelmaa, ulkoiset reunaehdot esimerkiksi ympäröivien pintojen lämpötilat ja säteilylämmönsiirto eri pintojen välillä voidaan kuvata tarkemmin kuin aiemmissa ihmismalleissa (Holopainen, 2012).

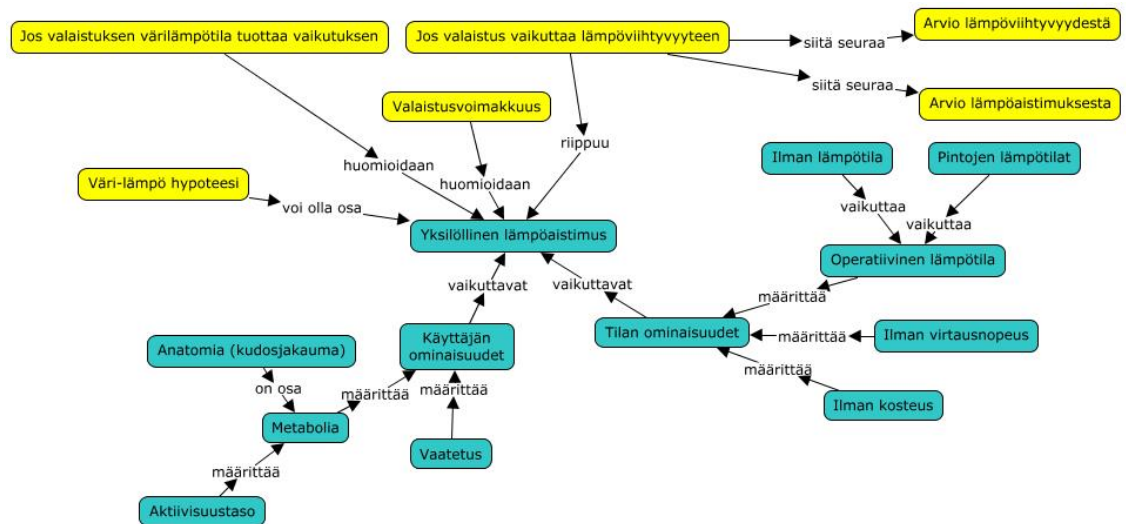
HTM-malli käyttää lämpöaistimus ja -viihtyisyyslaskennassa laskentametodia, joka on Zhangin kehittämä. Laskentametodilla voidaan arvioida lämpöaistimusta ja viihtyvyyttä myös muuttuvissa lämpöolosuhteissa. Kudosten lämmönsiirron, lämpöaistimuksen ja lämpöviihtyvyyden laskenta erilaisilla pysyvillä ja muuttuvilla reunaehdoilla on validoitu vertaamalla simulointituloksia oikeilla ihmisillä toteutettuihin mittauksiin. HTM-mallilla simuloidut lämpöaistimukset vastaavat mittaustuloksia paremmin kuin Fangerin PMVmenetelmällä toteutetut (Riikka Holopainen, 2012).

Hyvän lämpöviihtyvyyden reunaehdot arvioitiin simuloimalla erilaisten sisäisten ja ulkoisten muuttujien vaikutusta lämpöaistimukseen. Tulosten mukaan operatiivinen lämpötila, aktiivisuustaso ja vaatetus ovat tärkeimmät reunaehdot lämpöaistimukselle ja -viihtyvyydelle (Riikka Holopainen, 2012).

HTM-malli (*Human Thermal Model*) ottaa huomioon tilan ja käyttäjän asettamat reunaehdot. Tilan asettamia reunaehdoja ovat operatiivinen lämpötila (ilman lämpötila ja pintojen lämpötila), ilman virtausnopeus ja ilman kosteus. Käyttäjän asettamia reunaehdoja ovat metabolia (anatomia (kudosjakauma) ja aktiivisuustaso) ja vaatetus (Pekka Tuomaala, 2014).

## 4 Menetelmät

Alla olevan käsitekartan (kuva 5) avulla pohdittiin tutkimuksen toteutusta. Käsitekartan laadinnassa käytettiin apuna *CmapTools*-ohjelmaa. Käsitekartta perustuu osittain Pekka Tuomaalan seminaariin ”Ihmisten yksilöllisten lämpöaistimusten arviointi”.



Kuva 5. Käsitekartta tutkimuksen toteuttamisesta.

Yksilölliseen lämpöaistimukseen vaikuttavat valaistus, valaistusvoimakkuus, valaistuksen värilämpötila, värilämpöhypoteesi, käyttäjän ominaisuudet sekä tilan ominaisuudet. Valaistuksen vaikuttaessa lämpöviihtyvyyteen siitä seuraa arvio lämpöviihtyvyydestä ja lämpöaistimuksesta. Väri-lämpö hypoteesi voi vaikuttaa yksilölliseen lämpöaistimukseen. Valaistuksen värilämpötila voi tuottaa vaikutuksen yksilölliseen lämpöaistimukseen?

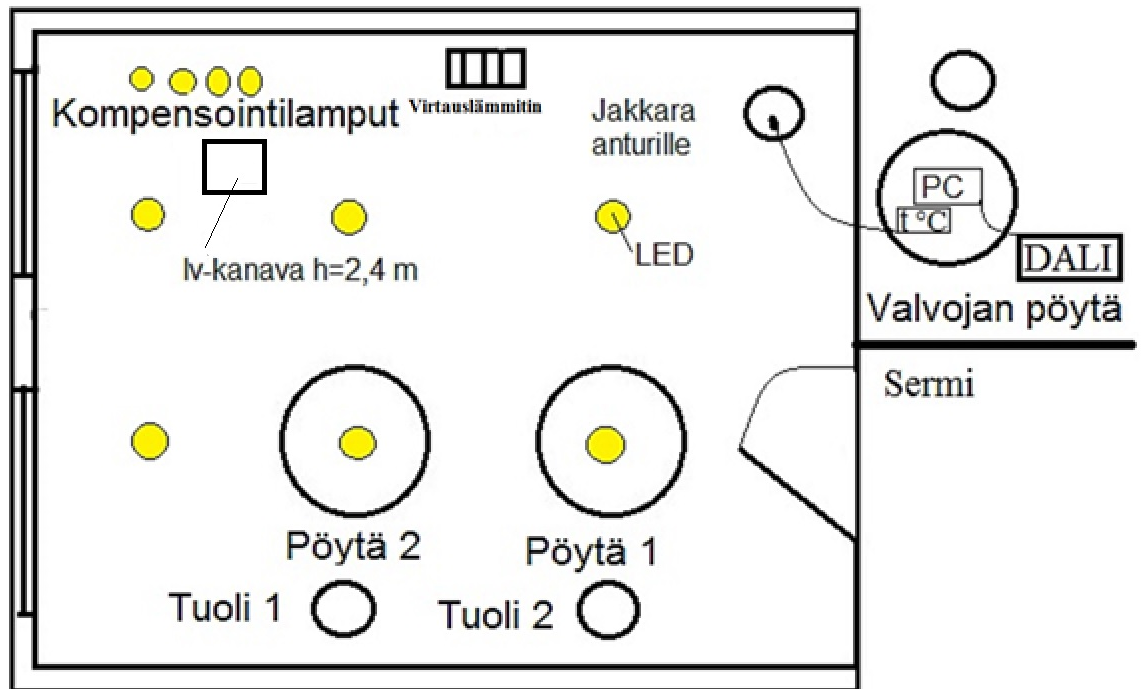
Käyttäjän ominaisuuksilla on vaikutusta yksilölliseen lämpöaistimukseen. Käyttäjän ominaisuudet määrittää ihmisen aineenvaihdunta (metabolia), jonka osana on kudosjakauma (anatomia) sekä määrittävänä osana aktiivisuustaso. Myös ihmisen vaatetus määrittää käyttäjän ominaisuuksia.

Tilan ominaisuuksilla on vaikutusta yksilölliseen lämpöaistimukseen. Tilan ominaisuudet määrittää ilman kosteus ja virtausnopeus sekä operatiivinen lämpötila. Operatiiviseen lämpötilaan vaikuttavat ilman lämpötila ja pintojen lämpötilat.

### 4.1 Koetila

Tutkimus aloitettiin alkuvuodesta 2015. Koehuoneena oli toimistohuone (4.3 x 3.3 x 2.4 m). Koehuoneessa oli alaslaskettu katto, jossa upotettuna 6 kpl LED-valaisimia. Ikkunat olivat peitetty mustalla pahvilla ja varustettu alumiinisäleverhoilla. Ikkunat peitettiin lisäksi paksulla vaalealla verholla ehkäisemään mahdollista vedontunnetta ja luomaan tilasta heijastussuhteeltaan tasajakoisemman.

Alla olevassa kuvassa 6 on esitetty koehuone. Valaistusta ohjataan Dali-standardin mukaisella Digidim Toolbox-ohjelmalla. Tilan heijastussuhteet olivat seinät (0,7), katto (0,8), lattia (0,2) ja pöydät (0,3), pinnat olivat vaaleasävyiset.



Kuva 6. Valaisimet ja pöytien sijainti koetilassa.

Huone suunniteltiin kahdelle koehenkilölle. Molemmille oli varattu oma pöytä, jossa oli kannettava tietokone tai vaihtoehtoisesti kokeen aikana saattoi lukea mukanaan tuomaansa materiaalia.

## 4.2 Huoneen lämpötila

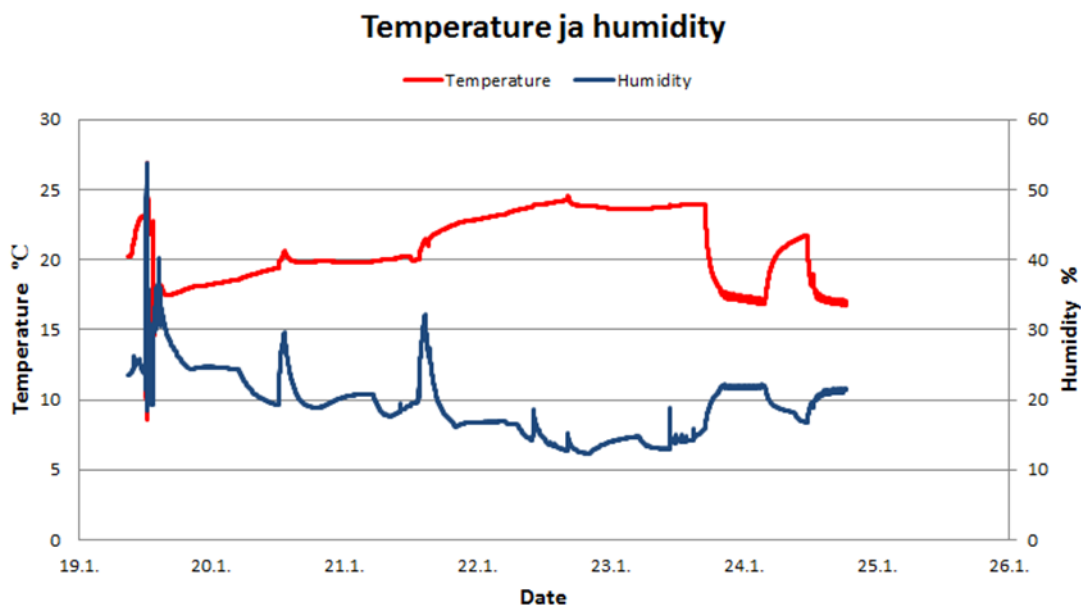
Kokeessa käytettiin kahta huonelämpötilaa 20 °C ja 26 °C. Koehuoneen termostaatti oli säädetty 20 °C:een. Koehuoneen termostaatti vaikutti huonelämpötilaan, mutta ei riittävästi ylempään huonelämpötilaan. Alempi huonelämpötila saatiin termostaattia säätämällä. Testihuoneeseen oli sijoitettu *dataloggeri*, joka otti näytteen lämpötilasta ja ilmankosteudesta. LEDvalaisimet olivat päällä jatkuvasti. Kannettava tietokone aiheuttaa noin 20 W lämpökuorman.

Koehuoneen lämpötilan vakautta mitattiin dataloggerilla Tinytag TV-4506, joka otti näytteitä huoneen lämpötilasta ja kosteudesta viikon ajan. Koehuone oli ollut ilman lämmitystä ennen mittausta, josta johtuu alun korkeampi ilmankosteusprosentti.

Keskikokoisen ihmisen lämmöntuotto erittäin kevyessä työssä on 130 W. Erittäin kevyet työt ovat istumista (kevyttä käsillä tehtävää työtä) tai seisomista (havainnointia ja tarkastamista) (Juhani Hassi et. al., 2002). Kahta koehenkilöä kompensoimaan asennettiin neljä kpl hehkulamppuja, jotka olivat kokonaisteholtaan 255 W.

Alla olevassa kuvassa on esitetty koehuoneen lämpötila ja ilmankosteusprosentti. Testeissä huonelämpötila 20 °C oli stabiili kokeen aikana. Koetilan huonelämpötila 26 °C ei onnistunut tilan omalla lämmitysjärjestelmällä, tilaan jouduttiin tuomaan virtauslämmitin (750 W).

Huonelämpötila 26 °C oli stabiili kokeen aikana. Kuitenkaan kokeita ei järjestetty heti aamulla, koska keskuslämmitystä lisättiin viikonlopun ja pakkasyön jäljiltä. Tämä vaikutti eritoten 26 °C:n huonelämpötilaan. Aamulla koetilan sai haluttuun huonelämpötilaan alle kahdessa tunnissa.



**Kuva 7. Koetilan lämpötila ja ilmankosteusprosentti viikon ajalta**

Koehuoneen seinään porattiin reikä, josta sijoitettiin lämpömittarin anturi sisälle huoneeseen. Anturi sijaitsi jakkaralla ilmassa. Lämpömittarin näyttö sijoitettiin koetilan ulkopuolelle valvojan pöydälle. Valvojan pöydältä pystyttiin tarkistamaan huoneen sisälämpötila. Huoneen oven avaus hankaloitti lämpötilan mittausta. Kehon lämpötilan mittausta varten ostettiin kaksi pintalämpöä mittaavaa kuumemittaria.

Valvojan pöytä sijoitettiin huoneen ulkopuolelle, jotta tutkija ei omalla lämmöllään häiritse koehenkilöitä, lisäksi tila on ahdas kolmelle. Käytävällä valvojan pöytä suojattiin sermillä. Valvojan pöytä muodostuu pöydästä, tuolista ja tietokoneesta Digidim Toolbox-ohjelmalla.

### 4.3 Valaistus

Taulukossa 2 on esitetty jokaisen kierroksen valaistusvoimakkuus ja värilämpötila. Aika tarkoittaa juoksevaa aikaa kokeen alusta, siten värilämpötila muuttui noin minuutin välein. Huoneen lämpötila on koehuoneen lämpötila, jonka valvoja merkitsee ylös (luku tapahtuu valvojan pöydältä olevalla näytöltä).

**Taulukko 2. Kokeessa käytetyt valaistusarvot.**

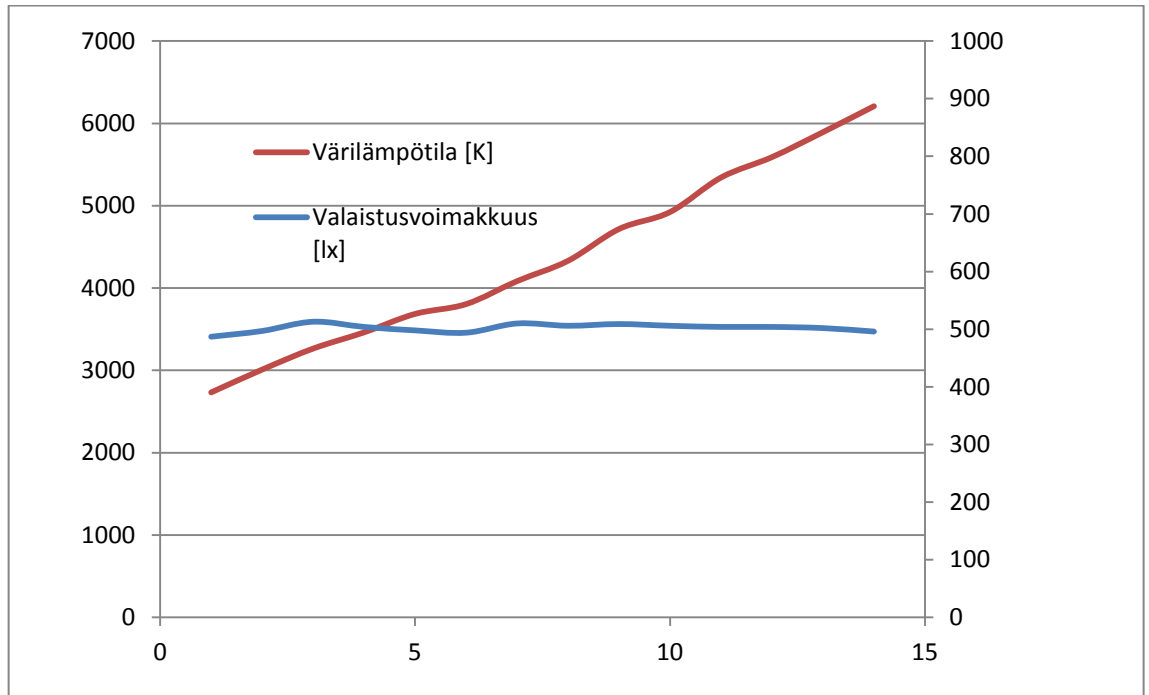
Krs	E/lx	CCT/K	Aika/min		Huoneen lämpötila $t_0=$ C°
1	487	2733	10 BEEP	0-10 min äänimerkki	Huoneen lämpötila $t_{10}=$ C°
2	497	3010	12	-	-
3	513	3265	13	-	-
4	504	3462	14	-	-
5	498	3686	15	-	-
6	494	3805	16	-	-
7	510	4084	17	-	-
-	-	-	27 BEEP	0-27 min äänimerkki	Huoneen lämpötila $t_{27}=$ C°
8	506	4331	29	-	-
9	509	4717	30	-	-
10	506	4923	31	-	-
11	504	5342	32	-	-
12	504	5590	33	-	-
13	502	5893	34	-	-
14	496	6208	35	-	-
-	-	-	40 BEEP	-	Huoneen lämpötila $t_{40}=$ C°
			43	Loppu 0-43 min	

Koehuoneessa oli alaslaskettu katto, jossa upotettuna 6 kpl LED-valaisimia. Kuvassa 6 on esitetty valaisimien sijoittelu koehuoneeseen. Valaistusta ohjataan Dali-standardin mukaisella Digidim Toolbox-ohjelmalla. Valaisimet olivat tyypiltään Zumtobel Infinity HF 200 27W LED927-65 (77 lm/W) (2733-6208 K). LED-valaisimien värintoistoindeksi oli valmistajan mukaan  $Ra \approx 90$ .

Koehenkilöt eivät havainneet värilämpötilan muutosta, koska nousu tapahtui pienin portain. Taulukko 1 on osa valvojan käyttämästä koepöytäkirjasta. Noin puolet kokeista tehtiin samoin kuin koepöytäkirjassa ja toinen puoli kylmästä värilämpötilasta (6208 K) lämpimään värilämpötilaan.

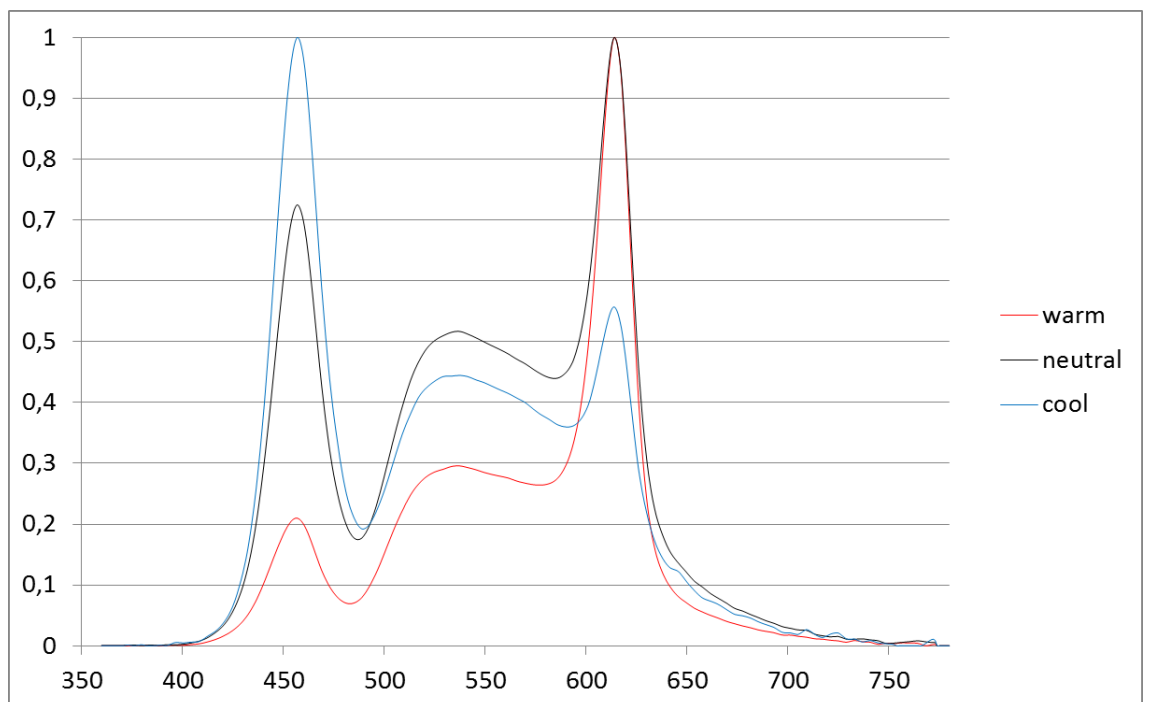
Valaistusvoimakkuus  $E$  [lx] ja värilämpötila ( $CCT$ ) mitattiin keskeltä pöytää 2 (lattiasta  $h=0,73$  m). Jokaisesta valaistuskierroksesta koehuoneessa mitattiin värilämpötila ja valaistusvoimakkuus. Taulukossa 1 oli valaistusvoimakkuuden ja värilämpötilan mittauksessa mittalaitteena käytetty Konica Minolta CL-500 A valaistusvoimakkuus spektrofotometria. Ennen mittausta LED-valaisimet olivat päällä valaistuskierroksessa 1. Kaikki 14 valaistuskierrosta mitattiin pöydän 1 ja 2 keskeltä, jotta molemmilla pöydillä olisi sama valaistusvoimakkuus. Heijastuskertoimien määrittämiseen käytettiin valaistusvoimakkuusmittaria, LMT Pocket-lux 2.

Alla olevassa kuvassa 8 on esitetty valaistusvoimakkuus ja värilämpötila kokeen aikana. X-akselilla on esitetty testikierros. Valaistusvoimakkuus pyrittiin pitämään vakiona koko kokeen ajan (sininen käyrä ja oikea y-akseli) ja värilämpötila muuttuu (2733-6208 K ja vasen y-akseli).



**Kuva 8. Kokeessa käytetyt värilämpötilat ja valaistusvoimakkuudet.**

Koehuoneesta mitattiin valaistuksen spektri värilämpötiloilla (CCT) 2733 K, 4084 K ja 6208 K. Nämä värilämpötilat vastasivat kierroksia (Dali) 1,7 ja 14. Alla olevassa kuvassa 9 on esitetty valaistusspektrit.



**Kuva 9. Valaistuksen spektri.**



## 4.4 Koehenkilöt

Koehenkilöitä värvättiin massasähköpostituksella Aalto-yliopiston Sähköteknisessä korkeakoulussa. Ensimmäisenä sähköposti lähetettiin Aallon henkilökunnalle, toisena Aallon Sähkövoimatekniikan kerholle ja kolmantena koko Aallon sähköpostilistalle. Koehenkilöt ilmoittautuivat *Doodle*-linkin kautta molempiin kokeisiin yhtä aikaa. Valvoja kuittasi ja vahvisti *Doodle*-viestit koehenkilöille ja lähetti ohjeet kokeeseen saapuville.

Ohjeet lämpöviihtyvyydestutkimuksen kokeeseen sisälsivät pyynnön *koehenkilöiden saapumisesta Otakaari 7 B aulaan 15 min ennen kokeen alkua, josta kokeen valvoja ohjaa perille. Kokeet suoritetaan Otakaari 7 B huoneessa 317. Koska tutkimus koskee lämpöviihtyvyyttä, toivomme koehenkilöiltä yhdenmukaista pukeutumista. Pukeutumistoiveena ovat lyhyet alusvaatteet, froteesukat, farkut (siniset/tummat), puuvillainen T-paita (O-kaulus ja vaalea). Kokeen ajaksi kengät ja päällysvaatteet jätetään lukittuun huoneeseen koetilan viereen.*

*Koetilassa on kaksi henkilöä kerrallaan. Koetilassa koehenkilöillä on läppäri käytössä tai voi ottaa lukemista mukaan. Koehenkilöt täyttävät esitietolomakkeen. Kokeen valvoja kertoo kokeen kulun. Kokeen aikana vastataan omien tuntemusten mukaan muutamaan rasti ruutuun kysymykseen ympäristö-olosuhteista. Ohjeistus päättyi kokeen valvojan yhteystietoihin.*

Pukeutumisen ohjeistus oli tärkeää, koska pukeutuminen vaikuttaa lämpöaistimukseen ja lämpöviihtyvyyteen. Kokeeseen osallistui seitsemän miestä ja yhdeksän naista. Koehenkilöiden keski-ikä oli 38,3 vuotta. Nuorin koehenkilö oli 15 vuotta ja vanhin 57 vuotta.

## 4.5 Kysymyslomakkeet

### 4.5.1 Esitietolomake

Esitietolomakkeeseen (liite B) merkittiin päivämäärä. Valvoja suoritti koehenkilöille värinäkötestin, jonka tulos merkittiin esitietolomakkeeseen. Lomakkeessa kysyttiin silmä- ja piilolaseista ja niiden sävytyksestä. Koehenkilöt kirjoittivat lomakkeeseen pituutensa ja painonsa.

Lomakkeessa kysyttiin sukupuoli ja ikä. Koehenkilöt mittasivat kaulan ja vyötärön ympärysmittan sekä naiset lisäksi lantion ympärysmittan. Valokuvauksesta merkittiin rasti lomakkeeseen. Lomakkeeseen merkittiin pöydän numero, sähköpostiosoite ja otsan lämpötila. Kysytyillä tiedoilla voidaan laskea kehon rasvaprosentti USA Navyn kehittelemällä menetelmällä. Rasvaprosentti tarvitaan laskettaessa VTT-mallilla lämpöviihtyvyyttä ([http://ramui.com/Java\\_script\\_code\\_example/us-navy-body-fat-calculator-script.html](http://ramui.com/Java_script_code_example/us-navy-body-fat-calculator-script.html)).

#### 4.5.2 Lomakkeet kokeen aikana

Koehenkilöt täyttivät kolme samankaltaista testilomaketta (liite 3,4 ja 5) kokeen aikana. Testi- eli kysymyslomakkeessa (liite C) pyydetään arvioimaan lämpöaistimusta, arviointitermit väripalkissa ovat hyvin kuuma, kuuma, lämmin, hieman lämmin, neutraali, hieman viileä, viileä, kylmä ja hyvin kylmä. Väripalkin alapuolella on jana johon koehenkilöt merkitsivät tuntemuksensa rastilla (viivalla).

Lämpöviihtyvyyden arviointi tapahtui samalla tavalla, mutta arviointitermit olivat erittäin viihtyisä, hieman viihtyisä, hieman epäviihtyisä ja hyvin epäviihtyisä. Arviointitermien välissä oli tyhjää, joten jana on samanpituisen kuin edellisessä kysymyksessä.

Kokeen jälkeen koehenkilöiden vastaukset koodattiin numeroksi asteikolla 0-9. Janan alkupiste oli 0 ja loppupiste 9 ja väliarvot saatiin mittaamalla viivoittimella koehenkilöiden merkitsemän rastin paikka ja laskemalla sen arvo, kun maksimiarvo oli 9. Arvot laskettiin yhden desimaalin tarkkuudella.

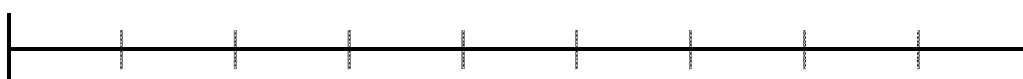
##### Lämpöaistimus

Hyvin kuuma	Kuuma	Lämmin	Hieman lämmin	Neutraali	Hieman viileä	Viileä	Kylmä	Hyvin kylmä



##### Lämpöviihtyvyys

Erittäin viihtyisä			Hieman viihtyisä		Hieman epäviihtyisä			Hyvin epäviihtyisä



Kuva 10. Lämpöviihtyvyyden ja lämpöaistimuksen arviointi.

Seuraavaksi lomakkeessa oli kolme väittämää: Ilma on raikas, valoa on riittävästi ja valon väri on miellyttävä. Tästä koehenkilö rasti ruudun väliltä 7 (Täysin samaa mieltä) tai 1 (Täysin eri mieltä), jako oli kokonaisluvuin. Lopuksi oli koehenkilön lämpötilan mittaaminen otsasta, kämmenestä, kynärvarresta ja nilkasta.

Valvoja täytti koepöytäkirjan jokaisesta kokeesta. Koepöytäkirja (liite F) sisältää muistilistan valvojan tehtävistä. Valvoja merkitsee ylös koehuoneen lämpötilan mittauksen koehenkilöiden testilomakkeen täytön yhteydessä ja koehuoneen alkulämpötilan mittauksen. Koepöytäkirja (liite F) sisältää aikataulun värilämpötilan muuttamisesta.

## 4.6 Kokeen kulku

Tutkimuksen alussa mitattiin viikon ajan koehuoneen ilmankosteutta ja lämpötilan stabiilisuutta. Tämän jälkeen koehuoneen lämpötilaa seurattiin säännöllisesti, jotta se olisi mahdollisimman lähellä haluttua lämpötilaa. Valvoja otti koehuoneen lämpötilan ylös neljä kertaa yksittäisen tutkimuksen aikana. Nämä kerrat olivat huoneen lämpötila ajan hetkellä  $t_0$  (2733 K),  $t_{10}$  (2733 K),  $t_{27}$  (4084 K) ja  $t_{40}$  (6208 K).

Ennen kokeiden alkua koehuoneen työpöydän yksi lämpötilaa mitattiin oskilloskoopilla lanka-anturilla. Lanka-anturi suojattiin pahvilaatikkoon, koska anturi reagoi välittömästi tutkimushuoneen oven avaukseen. Oskilloskoopista seurattiin lämpötilan vaihtelua.

Tilassa suoritettiin harjoitusmittaus yhdellä testihenkilöllä. Kompensointilamppu otettiin pois päältä. Koe kesti 43 minuuttia, kokeen aikana huonelämpötila laski 0,5 °C. Mittauspaikan lämpömittarissa lämpötilat olivat 1 °C pienempiä, kuin tutkimuspöydällä olevassa oskilloskoopissa.

Varsinaiset kokeet aloitettiin kahdella testihenkilöllä. Koska tutkimus koskee lämpöviihtyvyyttä, toivoimme koehenkilöiltä yhdenmukaista pukeutumista. Pukeutumistoiveena olivat lyhyet alusvaatteet, froteesukat, farkut (siniset/tummat), puuvillainen T-paita (O-kaulus ja vaalea). Kokeen ajaksi kengät ja päällysvaatteet jätettiin lukittuun huoneeseen koetilan viereen.

Kompensointilamput ja oskilloskooppi olivat suljettu ennen kuin koehenkilöt pääsivät koetilaan. Huoneessa vallitseva lämpötila ei näkynyt mistään koehenkilöille. Huonetermostaatin näyttö oli peitetty.

Aluksi varmistettiin tutkimustilan tietokoneiden toiminta. Valvoja soitti ovikelloa esimerkiksi. Ovikellolla annettiin äänimerkki, jonka jälkeen koehenkilöt täyttivät aina kyselylomakkeen. Valvoja otti koehenkilöistä valokuvan, jossa he seisovat oman pöytänsä takana. Valokuvasta voi arvioida koehenkilön lihaksikkuuden. Lihaksikkuustieto tarvitaan laskettaessa VTT-mallilla lämpöviihtyvyyttä. Kokeen alussa valvoja esitti paperista (liite 1) lämpöviihtyvyystudkimuksen koehenkilöille, jotta esittely olisi yhdenmukainen kaikille koehenkilöille.

Esittelypaperissa päällysvaatteet ja kengät kehoitetaan laittamaan viereiseen lukittuun huoneeseen. Koehuoneessa on kaksi pöytää. Koehenkilö istuu pöydän ääressä kokeen ajan, liikkuminen huoneessa ei ole sallittua. Pöydän ja tuolin sijaintia ei pidä muuttaa. Kysymyksiin tutustumisen voi aloittaa heti kokeen alettua. Netissä voi surffata pöydällä olevalla kannettavalla tietokoneelle tai voi lukea omaa kirjaa. Äänimerkki (ovikello) tulee ensimmäisen kerran 10 minuuttia kokeen alusta. Äänimerkin jälkeen tulee täyttää ensimmäinen testilomake (testi 1). Täyttäkää ensin rastiruutuun tehtävät ja sen jälkeen lämpötilan mittaus. Kokeen aikana muuta kohtiin voi mainita tuntemuksista. Kokeen aikana voi käyttää kännykkää, mutta äänimerkin jälkeen tulee keskittyä testilomakkeen täyttöön.

Toinen äänimerkki tulee 27 minuuttia kokeen alusta ja ohjeet ovat kuten edellä. Kolmas äänimerkki tulee 40 minuuttia kokeen alusta ja ohjeet ovat kuten edellä. Koe loppuu 43 minuuttia kokeen alusta. Tuleva toinen osa tutkimusta on hyvin samankaltainen kuin nyt tehtävä tutkimus. Esitietolomaketta ei täytetä toista kertaa, jolloin tutkimusaika jää lyhyemmäksi. Kiitos ensimmäiseen osaan osallistumisesta ja tervetuloa seuraavaan tutkimukseen. Sama lämpöviihtyvyystudkimuksen esittely oli myös esillä englanniksi.

Kun esitietolomake oli täytetty molemmilla koehenkilöillä. Valvoja kysyi, onko kysyttävää? ja sulkee koehuoneen oven. Koehuoneessa oli valaistuskierros 1 (2733 K) 10 minuuttia, jonka jälkeen valvoja antoi äänimerkin. Koehenkilöt täyttivät testilomakkeen 1. Koehenkilöt mittasivat testin 1 lopuksi kuumemittarilla lämpötilan otsasta, kämmenestä, kyynärvarresta ja nilkasta, nämä lämpötila-arvot merkittiin testilomakkeeseen.

Vyötärön, kaulan ja lantion (naiset) ympärysmitta mitattiin Prym värillisellä ompelumittanauhalla. Koehenkilöt punnitsivat itsensä digitaalisella Silvercrest henkilövaa'alla, valvoja valvoi mittaustapahtumaa. Vaa'an maksimipaino on 180 kg. Vaa'an toleranssi on  $\pm 3$  prosenttia.

Osassa mittauksia oli käytössä Squirrel 2040 dataloggeri, joka mittaa useammasta pisteestä lämpötilaa ( $\pm 0,1$  °C). Lämpötila-anturi teipataan koehenkilön ihoon, jolloin saatiin tehokas ihokontakti. HTM-mallissa antureita kiinnitetään ihoon useita, tässä tutkimuksessa kehon vasemmalle puolelle (koehenkilöstä katsoen) otsaan, niskaan, yläselkään, rintaan, lantioon, kämmenselkään, kyynärvarteeseen, olkavarteeseen, sääreen ja jalkaterään.

Kehon lämpötilan mittaukseen oli kaksi kpl microlife NC 150 kuumemittaria ( $\pm 0,2$  °C). Mittari toimii kuten pintalämpömittari, jolloin mitattaessa ei vaadi kosketusta. Mittarissa on tilakytin, josta voi valita mitataanko lämpötilaa ihmisestä tai esimerkiksi seinästä.

Koehenkilö tuskastui antureiden asentamiseen ja määrään eikä aikataulu tahtonut pitää. Seuraavassa mittauksessa antureita oli ihossa kiinni neljä kappaletta, anturit sijaitsivat otsassa, niskassa, kämmenselässä ja sääressä. Näiden lisäksi olivat ympäristöä mittaavat anturit, jotka olivat sijoitettu verhoon, pöydälle yksi ja koehenkilöiden takana olevaan seinään (nämä olivat myös edellisessä mittauksessa). Tämä mittausratkaisu toteutui aikataulun puitteissa ja eikä haitannut koehenkilöä. Dataloggerin tiedot purettiin USB-portin kautta tietokoneelle.

Kokeen aikana valvoja muutti valaistuksen värilämpötilaa (CCT) Digidim Toolbox-ohjelman avulla 14 kertaa taulukossa 2 olevien aikojen mukaan. Koehuoneessa oli langaton ovikello ja mittauspaikan pöydällä ovikellon painike. Kokeen valvojan painaessa ovikelloa, koehenkilöt kuulivat merkkiään ja täyttivät kysymyslomakkeen (liite C) taulukon yksi aikojen mukaisesti. Valvoja merkitsee ylös koepöytäkirjaan (liite F) koehuoneen alkulämpötilan ja lämpötilat äänimerkin jälkeen.

Lämpötilan mittauksessa käytettiin myös digitaalista sisä- ja ulkolämpömittaria. Mittauksissa ulkoanturi on koehuoneessa ja lämpömittarin näyttö valvojan pöydällä. Seinien lämpötilaa mitattiin TASCOTHI-440 pintalämpömittarilla. Mittarin jakoväli on 1 °C, joten mittaukset olivat suuntaa-antavia.

12 minuutin kuluttua aloituksesta valvoja laittoi päälle valaistuskierroksen 2 (3010 K). Seuraavat valaistuskierrokset valvoja laittoi päälle 1 minuutin välein. 17 minuutin kohdalla valvoja laittoi päälle valaistuskierroksen 7 (4084 K). 27 minuutin kuluttua aloituksesta valvoja antoi äänimerkin. Koehenkilöt täyttivät testilomakkeen 2, sekä suorittivat lämpötilan mittaukset. 29 minuutin kuluttua aloituksesta valvoja laittoi päälle valaistuskierroksen 8 (3010 K). Seuraavat valaistuskierrokset valvoja laittoi päälle 1 minuutin välein.

35 minuutin kohdalla valvoja laittoi päälle valaistuskierroksen 14 (6208 K). 40 minuutin kuluttua aloituksesta valvoja antoi äänimerkin. Koehenkilöt täyttivät testilomakkeen 3, sekä suorittivat lämpötilan mittaukset.

Koe oli ohi 43 minuutin jälkeen, tutkimustilan ovi avattiin ja kysymyslomakkeet kerättiin. Kompensointilamput kytkettiin päälle ja Digidim Toolbox-ohjelma laitettiin kierrokselle yksi (2733 K). Koetilan lämpötilan vakautta tarkkailtiin myös kokeiden välissä.

Toinen puoli koehenkilöistä oli testattu käänteisessä järjestyksessä taulukoon 1 verrattuna eli kierros 14 oli ensimmäisenä (6208 K)(liite 5). Sen jälkeen kun langaton ovikello meni rikki, toteutustapaa muutettiin; valvoja koputti oveen ja huusi testi yksi jne.

Koetilan lämmitin otettiin pois ja huonetermostaatti säädettiin 22 °C. Alempi tavoite T oli 20 °C. Ylemmän tavoite T:n 26 °C saavuttamiseen tarvitsi ylimääräisen lämmittimen, koska tilan lämmitys ei itsessään riittänyt, vaikka termostaatti oli säädetty 28 °C. Kylminä talviaamuina keskuslämmitys tuotti koehuoneeseen 28 °C, jolloin termostaatin lämpötilaa pienennettiin. Alempi tavoitelämpötila 20 °C toteutui viikonlopun aikana.

Alla olevassa kuvassa 11 (kollaasi) on esitetty koehuone lämpimässä (2733 K, vasen), neutraalissa (4084 K, keskellä) ja kylmässä värilämpötilassa (6208 K, oikealla).



**Kuva 11. Näkymä koehuoneesta 2733, 4084 ja 6208 K (Mikko Maksimainen).**

Kokeet alemmalla tavoitelämpötilalla (20 °C) alkoivat tiistaina. Koehenkilöt testattiin taulukon 2 mukaisella järjestyksellä ja toinen puoli koehenkilöistä käänteisellä järjestyksellä verrattuna taulukkoon 2. Myöhemmin keväällä osalle koehenkilöistä suoritettiin kehon koostumismittauksia Body explorer-mittalaitteella. Mittaus perustuu kehon imbedanssin mittaukseen. Mittausten perusteella selvitetään myöhemmin laskennallinen lämpöviihtyvyys.

## 5 Tulokset

### 5.1 Arvio lämpöviihtyvyydestä

Taulukossa 3 on esitetty lämpöviihtyvyyden tulokset matalammalla ja korkeammalla huonelämpötilalla. Lämpöviihtyvyyden arviointiin koehenkilöt käyttivät kuvan 10 alempaa merkintäjanaa. Koehenkilöiden käyttämällä merkintäjanalla ei ollut lukuarvoja, mutta koehenkilöiden merkinnät on myöhemmin koodattu siten, että janalla nolla on erittäin viihtyisä ja maksimiarvo yhdeksän on hyvin epäviihtyisä. T1 tarkoittaa testi 1, jonka koehenkilöt täyttivät koetilassa 2733 K värilämpötilassa. T2 vastaavasti testi 2, 4084 K värilämpötilassa ja T3 testi 3, 6208 K värilämpötilassa. Keltaisella ja kursivilla merkityissä arvoissa koejärjestys oli käänteinen (ensin kylmä värilämpötila 6208 K).

Taulukko 3. Lämpöviihtyvyys mittaustulokset.

Lämpöviihtyvyys				Lämpöviihtyvyys			
(0=erittäin viihtyisä) t=20 °C				(0=erittäin viihtyisä) t=26 °C			
Henkilö	2733 K	4084 K	6208 K	2733 K	4084 K	6208 K	
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	
a	4,5	5,5	7,7	4,6	2,5	3,5	
b	4,6	6,5	6,5	1,6	2,5	2,5	
c	4,7	5,5	5,5	4,5	3,5	3,6	
d	7,9	8,2	8,3	3,9	2,2	1,8	
e	6,7	7,3	3,1	2,5	6,2	5,2	
f	7,3	6,8	7,1	0,5	5,5	5,5	
g	4,4	2,4	1,4	3,4	5,4	0,5	
h	1,6	2,6	1,6	3,7	3,2	4,5	
i	6,4	5,5	7,5	2,5	4,5	5,4	
j	5,7	5,7	6,8	2,8	2,5	5,4	
k	7,4	7,6	6,4	1,5	2,5	2,5	
l	7,8	7,3	6,7	5,6	3,5	5,4	
m	4,5	4,6	3,3	3,5	1,5	1,5	
n	8,5	8,5	8,4	4,4	3,5	7	
o	5,4	4,5	6,5	2,5	2,4	3,5	
p	7,4	3,4	5,4	5,5	2,5	2,5	
Ka.	5,9	5,7	5,8	3,3	3,4	3,8	
SD.	1,8	1,9	2,2	1,4	1,4	1,8	

Matalammalla huonelämpötilalla (20 °C) koehenkilöt kokivat huoneen lämpötilan lämpimässä (5,9), neutraalissa (5,7) ja kylmäsävyisessä värilämpötilassa **hieman epäviihtyisänä** (5,9). Tuloksien hajonta oli välillä 1,8-2,2.

Korkeammalla huonelämpötilalla (26 °C) koehenkilöt kokivat huoneen lämpötilan lämpimässä (3,3), neutraalissa (3,4) ja kylmässä värilämpötilassa **hieman viihtyisänä** (3,8). Tuloksien hajonta oli välillä 1,4-1,8.

## 5.2 Arvio lämpöaistimuksesta

Taulukossa 3 on esitetty lämpöaistimuksen tulokset matalammalla ja korkeammalla huonelämpötilalla. Lämpöaistimuksen arviointiin koehenkilöt käyttivät kuvan 10 ylempää merkintäjanaa. Koehenkilöiden käyttämällä merkintäjanalla ei ollut lukuarvoja, mutta koehenkilöiden merkinnät on myöhemmin koodattu siten, että janalla nolla on hyvin kuuma ja maksimiarvo yhdeksän on hyvin kylmä. T1 tarkoittaa testi 1, jonka koehenkilöt täyttivät koetilassa 2733 K värilämpötilassa. T2 vastaavasti testi 2, 4084 K värilämpötilassa ja T3 testi 3, 6208 K värilämpötilassa. Keltaisella ja kursivilla merkityissä arvoissa koejärjestys oli käänteinen (ensin kylmä värilämpötila 6208 K).

Taulukko 4. Lämpöaistimus mittaustulokset.

Lämpöaistimus				Lämpöaistimus			
(0=hyvin kuuma) t=20 °C				(0=hyvin kuuma) t=26 °C			
	2733 K	4084 K	6208 K		2733 K	4084 K	6208 K
Henkilö	T1	T2	T3		T1	T2	T3
a	5,5	6,6	6,7		3,5	5,5	2,5
b	5,5	6,5	6,7		4,6	5,5	3,6
c	5,6	5,5	5,6		3,4	4,5	4,6
d	7,5	7,7	7		2,2	2,4	2,8
e	6,5	7,4	4,8		4,4	5,3	3,2
f	7,4	6,8	7,1		4,5	5,4	6,3
g	7,5	5,4	4,4		3,4	4,4	5,5
h	6,5	4,5	4,5		2,5	2,5	2,5
i	6,4	6,5	7,5		2,5	5,5	5,4
j	6,8	6,3	7,1		1,8	5,1	6,3
k	7,4	7,4	6,5		2,5	3,6	2,5
l	7,1	6,8	6,4		2,5	3,4	2,4
m	4,5	4,5	5,6		2,5	3,4	3,5
n	7,4	7,2	7,3		3,8	3,6	2,2
o	5,5	5,4	6,5		3,5	4,5	3,5
p	6,5	4,4	6,4		1,3	2,5	2,5
Ka.	6,5	6,2	6,3		3,1	4,2	3,7
SD.	0,9	1,1	1,0		1,0	1,1	1,4

Matalammalla huonelämpötilalla koehenkilöt aistivat huoneen lämpötilan lämpimässä (6,5), neutraalissa (6,2) ja kylmäsävyisessä (6,3) värilämpötilassa **viileänä**. Tuloksien hajonta oli välillä (0,9-1,1).

Korkeammalla huonelämpötilalla koehenkilöt aistivat huoneen lämpötilan lämpimässä värilämpötilassa **hieman lämpimänä** (3,1). Neutraalilla värilämpötilalla huoneen lämpötila koettiin **neutraaliksi** (4,2). Kylmällä värilämpötilalla huoneen lämpötila koettiin **hieman lämpimäksi** (3,7). Tuloksien hajonta oli välillä 1,0-1,4.

## 5.3 Käyttäjien arviot

Taulukossa 4 on esitetty kunkin testin (T1-T3) yhteydessä kysytyt tehtävät väliltä 1-7. Ensimmäisenä esitettiin väittämä ilman raikkaudesta, toisena valon riittävyydestä ja kolmantena valon väri miellyttävyydestä. Kaikkiin tehtäviin koehenkilö vastasi väliltä 1- täysin eri mieltä tai 7- täysin samaa mieltä. Koehenkilöt täyttivät kysymykset kummallakin huonelämpötilalla (20 °C ja 26 °C). Keltaisella merkityissä arvoissa koejärjestys oli käänteinen (ensin kylmä värilämpötila 6208 K).

**Taulukko 5. Kysymystehtävien tulokset.**

Ilma on raikas				Valoa on riittävästi								Valon väri on miellyttävä							
L=lämmin N=neutraali K=kylmä																			
(1=täysin erimielistä) t=20 °C				t=26 °C				t=20 °C				t=26 °C				t=20 °C			
Hlö	L	N	K	L	N	K		L	N	K		L	N	K		L	N	K	
	T1	T2	T3	T1	T2	T3		T1	T2	T3		T1	T2	T3		T1	T2	T3	
a	7	7	6	5	6	5		6	5	5		4	7	7		7	5	4	
b	6	6	6	6	5	5		4	5	5		5	4	4		4	5	5	
c	5	5	5	3	3	4		4	5	5		5	5	4		5	5	5	
d	7	5	5	3	2	2		6	5	3		6	6	6		6	4	4	
e	6	6	5	4	6	4		5	7	7		4	5	6		7	3	5	
f	7	6	6	5	6	6		7	7	7		7	7	7		7	5	5	
g	6	7	6	7	1	6		4	6	6		1	7	7		3	6	7	
h	4	6	7	4	3	4		6	7	6		4	4	4		6	7	7	
i	7	6	7	4	5	6		5	7	5		5	7	7		6	5	5	
j	7	7	7	4	6	6		7	7	7		7	7	6		7	5	5	
k	5	6	6	5	5	4		5	6	7		5	6	7		5	6	6	
l	6	6	6	5	5	5		6	6	7		6	6	6		5	6	4	
m	5	3	5	4	3	3		5	6	6		5	6	6		6	5	4	
n	7	7	7	4	3	2		4	4	5		3	4	4		2	3	6	
o	6	6	6	5	5	3		6	6	5		6	7	7		6	6	4	
p	7	7	7	4	5	5		7	7	6		7	7	7		4	6	3	
Ka.	6,1	6,0	6,1	4,5	4,2	4,4		5,5	6,0	5,8		5,0	6,0	5,9		5,2	5,2	4,9	
Sd.	1,0	1,0	0,8	1,0	1,6	1,4		1,1	1,3	1,1		1,6	1,2	1,2		1,5	1,1	1,1	

Koehenkilöt vastasivat väittämiin ilman raikkaudesta, valon riittävyydestä ja valon värin miellyttävyydestä. Matalammalla huonelämpötilalla ilma koettiin raikkaaksi kaikilla värilämpötiloilla (6,0-6,1). Korkeammalla huonelämpötilalla ilma koettiin vähemmän raikkaaksi kaikilla värilämpötiloilla (4,2-4,5).

Koehenkilöt kokivat valoa olevan riittävästi molemmilla huonelämpötiloilla, kaikilla värilämpötiloilla (5,0-6,0). Valon väri koettiin melko miellyttäväksi molemmissa huonelämpötiloissa, kaikilla värilämpötiloilla (4,9-5,6).



## 5.4 Lämpötilan mittaus

Taulukossa 6 on esitetty koehuoneen lämpötila testien aikana ja koehenkilöiden kuumemittarilla mitatut lämpötilat aina testin lopuksi. Taulukko 6 on matalammasta (20 °C) ja korkeammasta huonelämpötilasta (26 °C). Keltaisella merkityissä arvoissa koejärjestys oli käänteinen (ensin kylmä värilämpötila 6208 K).

Taulukko 6. Lämpötilat

Lämminsävyisestä kylmäsävyiseen värilämpötilaan t=20 °C																		
Hlö	Huoneen lämpötila [°C]				Otsa [°C]				Kämmen [°C]			Kynnärvarsi [°C]			Nilkka [°C]			
	t0	t10	t27	t40	T0	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	
a	18,8	18,8	19	18,9	36,3	36,6	36,7	36,5	36,9	36,1	35,6	35,8	35,7	34,8	35,5	34,7	35,6	
b	18,8	18,8	19	18,9	35,9	36,3	36,8	36,6	36,8	36,6	36	36,1	36	35,8	36,2	36	35,7	
c	18,9	18,8	19	18,9	P	36,4	36,6	36,5	37,5	37,2	37	35,9	36,3	36,3	36,2	36,1	35,9	
d	19,1	18,7	18,7	18,7	36,2	37,1	36,5	35,9	L	L	L	35,6	34,5	34,1	36	35,7	35,2	
e	19,8	19,6	19,8	20	36,7	36,8	36,6	36,7	36,3	36,2	36,1	35,6	36	36	36	35,5	35	
f	19,8	19,6	19,8	20	36,2	36,1	36,1	36,1	L	L	L	35,6	35,3	34,7	34	L	L	
g	19,7	19,6	20,2	19,7	36,5	36,3	37	36,9	36,4	35,7	34,9	36	34,9	35,3	34,8	35,2	34,3	
h	19,7	19,6	20,2	19,7	36,3	36,5	36,6	36,6	35,2	35	34	36,7	36	36,1	35,6	34,9	35,1	
i	20	19,7	19,7	20	35,6	35,9	35,8	36,9	35,9	36,3	35,7	36,1	36,3	35,7	34,2	34,1	34,6	
j	20	19,7	19,7	20	35,9	36,6	36,7		34,4	34,6	34,3	35,5	35,5	35,7	35,1	34,2	35,2	
k	18,5	18,4	18,5	18,5	36,5	36,5	36,3	36,4	L	L	L	35,8	36,6	36,5	34,4	34,6	35,8	
l	18,5	18,4	18,5	18,5	35,9	36,3	36,5	36,1	36,4	36,3	36,6	34,5	35,1	35,2	34,2	35,7	35,9	
m	18,9	19,1	19,3	19,1	P	36,7	36,8	36,6	36,3	36	36,1	35,8	36	36	34,2	34,9	35,6	
n	18,9	19,1	19,3	19,1	36,6	36,8	36,7	36,5	35	35,6	35,7	35	35,7	35,9	L	34,2	35	
o	18,7	18,9	19	18,8	36,4	36,7	37	36,7	L	34,8	34,1	35,6	35,7	35,7	34,3	34,7	34,4	
p	18,7	18,9	19	18,8	36,8	36,7	37	36,8	34,2	34,8	34,3	35,6	35,6	35,4	35,5	34,7	35,5	
Ka.	19,2	19,1	19,3	19,2	36,3	36,5	36,6	36,5	35,9	35,8	35,4	35,7	35,7	35,6	35,1	35,0	35,3	
Sd.	0,6	0,5	0,5	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	1,0	0,8	1,0	0,5	0,6	0,6	0,8	0,7	0,5	
Lämminsävyisestä kylmäsävyiseen värilämpötilaan t=26 °C																		
Hlö	Huoneen lämpötila [°C]				Otsa [°C]				Kämmen [°C]			Kynnärvarsi [°C]			Nilkka [°C]			
	t0	t10	t27	t40	T0	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	
a	25,5	25,6	25,1	25,5	36,7	36,3	36,4	36,6	36,4	36,6	36,9	35,7	35,6	36	34,5	34,4	34,4	
b	25,5	25,6	25,1	25,5	36,1	36,5	36,8	36,6	36,5	36,5	36,6	36,4	36,3	36	35,3	35,2	35,4	
c	25,7	25	25	25,8	35,7	36,4	36,9	37	37,6	37,4	36,9	36,7	36,5	36,6	35,8	36,1	35,9	
d	25,1	25,3	25	25,8	36,9	37,3	37,5	36,8	36,1	36	36,1	35,8	36	36	35,9	35,9	35,8	
e	25,1	25,4	25	25,6	35,8	36,7	36,7	36	35,6	36	35,9	35,8	35,7	35,4	35,1	35,3	35,2	
f	25,4	24,7	25,2	25,5	36,2	36,7	36,9	36,9	36,5	35,8	35,4	35,5	35,6	35,6	35,4	35,3	35,2	
g	25	25,1	25,7	25,5	37,2	36,4	36,8	35	36,4	36,9	35	35,8	35,7	36,1	34,4	34,4	34,7	
h	25	25,1	25,7	25,5	36,4	36,6	36,8	36,6	35,2	35,3	35,8	35,9	36,1	36	34,9	35,2	35,1	
i	25	24,9	24,8	25,1	36,9	36,3	35,6	35,8	36,3	36,2	36,1	36,2	36,2	36,1	34,3	34,5	35,1	
j	25	24,9	24,8	25,1	36,7	35,6	36,3	36,4	35,7	35,6	35,4	35,6	35,4	35,3	34,4	34,1	34,5	
k	25,2	25,4	25	25,6	36,7	36,9	36,9	36,9	35,6	35,4	35,5	35,9	35,8	35,9	34,7	35,1	35,2	
l	25,2	25,4	25	25,6	36,2	36,2	36,7	36,4	36,4	36,2	36,3	35,4	35,7	35,5	35,4	35,3	35,5	
m	25,1	25,2	24,7	24,7	37	37,1	37,3	37,1	37,3	37,4	37,3	36,6	36,7	36,3	35,5	35,6	35,3	
n	25,6	25,6	26	25,6	36,5	37	37,2	37	36,8	36,5	36,6	36,2	36,3	36,1	35,2	35,4	35,8	
o	25,2	25,1	25,6	25,2	36,9	37,1	37,1	37	35,9	36,3	35,8	35,9	36,1	35,8	35,6	35,6	35,4	
p	25,2	25,1	25,6	25,2	36,9	37,3	37,3	36,9	35,7	35,6	36,2	36,1	35,8	35,7	36,1	36,2	36	
Ka.	25,2	25,2	25,2	25,4	36,6	36,7	36,8	36,6	36,3	36,2	36,1	36,0	36,0	35,9	35,2	35,2	35,3	
Sd.	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,6	0,6	0,5	

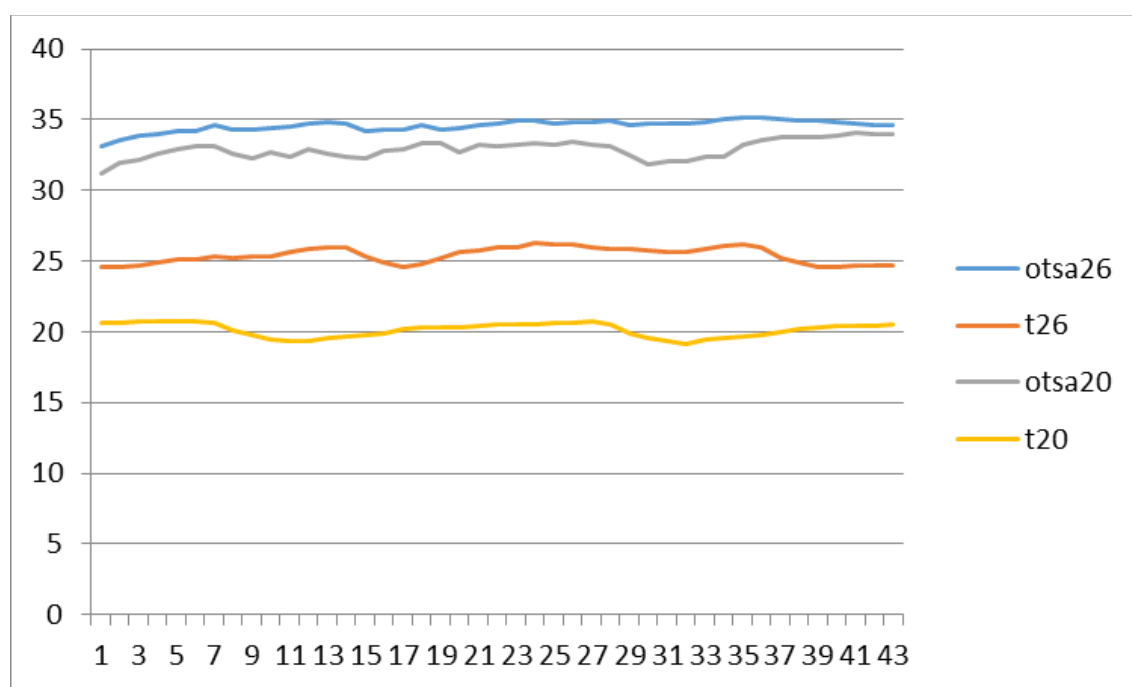
Taulukossa 6 matalammassa huonelämpötilassa (20 °C) koehuoneen lämpötila oli 19,1-19,3 °C (anturi koehuoneessa jakkaralla ja näyttö koehuoneen ulkopuolella, hajonta oli 0,5-0,6 °C. Otsan lämpötila oli 36,3-36,6 °C, hajonnan ollessa 0,3 °C. Kämmenten lämpötila oli 35,4-35,9 °C, hajonta oli 0,8-1,0 °C. Kynnärvarren lämpötila oli 35,9-36 °C, hajonta oli 0,3-0,4 °C. Nilkan lämpötila oli 35,2-35,3 °C, hajonta oli 0,5-0,6 °C.

Taulukossa 6 korkeammassa huonelämpötilassa (26 °C) koehuoneen lämpötila oli 25,2-25,4 °C (anturi koehuoneessa jakkaralla ja näyttö koehuoneen ulkopuolella, hajonta 0,2-0,4 °C. Otsan lämpötila oli 36,6-36,8 °C, hajonnan ollessa 0,4-0,6 °C. Kämmenten lämpötila oli 36,1-36,3 °C, hajonta oli 0,6 °C. Kyynärvarren lämpötila oli 35,9-36 °C, hajonta oli 0,3-0,4 °C. Nilkan lämpötila oli 35,2-35,3 °C, hajonta oli 0,5-0,6 °C.

Koetilan 11 kokeessa oli käytössä Squirrel 2040 dataloggeri, joka mittasi ympäristön ja kehon lämpöä antureilla. Mittaus muuttui ensimmäisen kokeen jälkeen, koska suuri määrä antureita koettiin tukalana. Loput mittaukset toteutettiin neljällä anturilla kehoon kiinnitettynä ja neljä anturia mittasi huoneen pintalämpötiloja.

## 5.5 Värilämpötila (CCT) vs. yksittäinen lämpötila T (°C)

Kuvassa 12 on esimerkkinä esitetty koehenkilö g:n otsan lämpötila ja koehuoneen terminen lämpötila ajan funktiona. Värilämpötilan muuttuminen ei aiheuttanut koehenkilöiden lämpötilassa havaittavaa muuttumista. Koehenkilö g:n otsan lämpötila seuraa huoneen lämpötilan vaihtelua.



**Kuva 12. Lämpötila ajan funktiona.**

Kuvan 12 näytearvot ovat saatu Squirrel 2040 dataloggerista. Koehenkilöt mittasivat testilomakkeiden täytön yhteydessä lämpötilan pintalämpökuumemittarilla (NC150). Värilämpötilan muuttuminen ei aiheuttanut koehenkilöiden lämpötilassa havaittavaa muuttumista.

Kuvassa 12 otsan lämpötila ylemmässä huonelämpötilassa on ylin käyrä. Toiseksi ylin käyrä on otsan lämpötila matalammassa huonelämpötilassa. Kolmanneksi ylin käyrä on huoneen lämpötila korkeammalla huonelämpötilalla. Alin käyrä on huoneen lämpötila matalammalla huonelämpötilalla.

## 5.6 Yhteenveto

Koehenkilöitä oli yhteensä 16, joista seitsemän oli miestä ja yhdeksän naista. Kaikki kokeeseen osallistuneet olivat maallikoita (ei kokemusta valaistustekniikasta). Koehenkilöiden ikien keskiarvo oli 38 vuotta, nuorin oli 15 ja vanhin 57 vuotta. Keskipituus oli 172 cm ja keskipaino oli 74 kg.

Kokeessa väri-lämpö hypoteesin vaikutusta, värilämpötilaa (*CCT*) muuttamalla ei saatu todennettua. Keskihajonnan vaihtelua oli niin paljon, että periaatteessa millä tahansa värilämpötilalla (*CCT*) kylmän aistimus olisi voinut olla suurin.

Matalammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan **viileänä** kaikilla värilämpötiloilla (*CCT*). Korkeammalla huonelämpötilalla koettu lämpötila oli **hieman lämmin** 2733 K värilämpötilalla. 4084 K värilämpötilalla koettu lämpötila oli **neutraali**. 6208 K värilämpötilalla koettu lämpötila oli **hieman lämmin**.

Matalammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan **hieman epäviihtyisänä** kaikilla värilämpötiloilla. Korkeammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan **hieman viihtyisänä** kaikilla värilämpötiloilla.

Koehenkilöt vastasivat väittämiin ilman raikkaudesta, valon riittävydestä ja valon värin miellyttävyydestä. Matalammalla huonelämpötilalla ilma koettiin raikkaaksi kaikilla värilämpötiloilla. Korkeammalla huonelämpötilalla ilma koettiin vähemmän raikkaaksi kaikilla värilämpötiloilla.

Koehenkilöt kokivat valoa olevan riittävästi molemmilla huonelämpötiloilla, kaikilla värilämpötiloilla. Valon väri koettiin melko miellyttäväksi molemmissa huonelämpötiloissa, kaikilla värilämpötiloilla. Neutraali värilämpötila oli korkeammalla huonelämpötilalla miellyttävin ja matalalla yhtä miellyttävä lämpimän värilämpötilan kanssa.

Koehenkilöiden tullessa värilämpötilaltaan lämpimään huoneeseen, josta kokeen kuluessa siirryttiin neutraalin kautta kylmään värilämpötilaan, väri-lämpö hypoteesi oli selkeämmin havaittavissa, kuin koehenkilöiden tullessa värilämpötilaltaan kylmään huoneeseen. Tämä oli havaittavissa korkeammalla huonelämpötilalla, mutta ei matalammalla.

Tutkimuksessa väri-lämpö hypoteesi tarkoittaa huonelämpötilan kokemista lämpimänä 2733 K värilämpötilassa (*CCT*), viileänä 4084 K värilämpötilassa ja viileämpänä 6208 K värilämpötilassa. Korkeammalla huonelämpötilalla lähdettäessä vain 2733 K, koehenkilöt kokivat lämpötilan lämpimänä ( $2,9 \pm 0,9$ ) 2733 K värilämpötilalla, neutraalina ( $4,3 \pm 1,3$ ) 4084 K värilämpötilalla ja neutraalina ( $4,8 \pm 1,6$ ). 0 tarkoitti hyvin kuumaa.

## 6 Pohdintaa

### 6.1 Väri-lämpö hypoteesi

Väri-lämpö hypoteesin mukaan ihminen aistii viileää kylmillä väreillä, esim. sininen ja lämmintä lämpimillä väreillä, esim. punainen. Väri-lämpö hypoteesitutkimuksia on käsitelty kappaleessa 2. Näistä tutkimuksista suurin osa liittyy värien vaihtamisen aiheuttamaan tuntemukseen, eikä valaistuksen värilämpötilan vaihtamiseen. Konventionaalisella valaistuksella värilämpötilan vaihtaminen on ollut hankalampaa (koehenkilön huomaamatta) ja tästä johtuen on tutkittu väri-lämpöhypoteesia väreillä tai lampun edessä on ollut suodatin. Voi olla että väri-lämpö hypoteesi vaikuttaa ajallisesti vain lyhyen ajan, jolloin merkitys energiatehokkuuden kannalta olisi vähäinen.

Koehenkilöiden tulivat värilämpötilaltaan lämpimään huoneeseen, josta kokeen kuluessa siirryttiin neutraalin kautta kylmään värilämpötilaan. Väri-lämpöhypoteesi oli selkeämmin havaittavissa, kuin koehenkilöiden tullessa värilämpötilaltaan kylmään huoneeseen. Oliko mahdollisesti rajulla värilämpötilan muutoksella vaikutusta vastauksiin, vaikka adaptaatioaika oli kymmenen minuuttia koetilaan tultaessa? Tämä oli havaittavissa korkeammalla huonelämpötilalla, mutta ei matalammalla.

Väri-lämpöhypoteesin vaikutus saattaa vaihdella ihmisestä toiseen. Koehenkilön ikä vaikuttaa aineenvaihduntaan. Ylemmässä huonelämpötilassa (26 °C) väri-lämpöhypoteesilla saattaa olla suurempi vaikutus kuin matalammassa huonelämpötilassa (20 °C) tai koetila tuntui istumatyöläisille jo liian kylmältä. Kylmän tuntemus voi dominoida aistit, niin että väri-lämpöhypoteesia ei havaita vai toimiiko väri-lämpöhypoteesi paremmin ylemmillä lämpötila-alueilla?

Standardissa ISO 7730 mainitaan lämpötyytymättömyyttä aiheuttavaksi lämpötilaero pään ja nilkkojen välillä. Koetilassa oleva ylempi huonelämpötila saavutettiin ilmastoinnin tuomalla lämmöllä, virtauslämmittimellä sekä rakennuksen muulla lämmöllä, esimerkiksi radiaattorin lämpöputket (2 kpl 3/8” vesijohtoputkea) menivät koehuoneen läpi ikkuna seinällä. Vaikka radiaattorin venttiili oli kiinni, lämpöputket olivat lämpimät. Ikkunaverhossa ja pöydässä 1 olevassa anturissa oli kokeiden aikana noin 2-3 °C lämpötilaeroa. Pöydän 1 pinnan ja jakkaralla olevan anturin välinen lämpötilaero oli ennen kokeiden alkua noin 1 °C.

Virtauslämmitin oli kiinni alemmalla huonelämpötilalla (20 °C). Aiheuttiko virtauslämmittimen kiinni oleminen lämpötyytymättömyyttä? Syntyikö liian korkea epäsymmetria lämpötilassa?

### 6.2 Valaistuksen värilämpötila

Tässä tutkimuksessa valaistuksen värilämpötilaa vaihdettiin lämpimästä kylmään ja päinvastoin. Tällä pyrittiin saamaan aikaan sama vaikutus kuin värien vaihtamisella. Tutkimuksessa havaittiin viitteitä väri-lämpöhypoteesin paikkansapitävyydestä. Hypoteesia voisi soveltaa kiinteistöjen energiatehokkuutta parantamaan, ohjaamalla valaistuksen värilämpötila lämminsävyiseksi talvella ja kylmänsävyiseksi kesällä? Lämmityksen tarvetta talvella voisi pienentää ja kesällä vähentää jäähdytyksen tarvetta.

Tutkimus viittaa siihen suuntaan että kesähelteillä kylmemmästä värilämpötilasta saattaisi olla hyötyä. Useissa Aasian maissa valaistus on kylmäsävyistä, tämä saattaa johtua kuitenkin enemmän valonlähteen hinnasta kuin viilentävästä vaikutuksesta. Tutkimuksen valossa jo neutraali värilämpötila (4000 K) voisi vähentää kesällä jäähdytysenergian tarvetta. Toisaalta valaistuksen tarve kesällä Suomessa on vähäisempää.

Älykkäällä valaistusjärjestelmällä voisi toteuttaa asiakkaan mieltymyksiä, esimerkiksi herätys kylmällä värilämpötilalla. Taiteilijalla sisävalaistuksen värilämpötila voisi seurata ulkoilman värilämpötilaa, jolloin ateljeehen mennessä adaptaatioaika jäisi pois.

## 7 Johtopäätökset

### 7.1 Väri-lämpö hypoteesi

Tutkimuksessa väri-lämpö hypoteesi tarkoittaa huonelämpötilan kokemista lämpimänä 2733 K värilämpötilassa (CCT), viileänä 4084 K värilämpötilassa ja viileämpänä 6208 K värilämpötilassa. Väri-lämpö hypoteesin vaikutusta värilämpötilaa (CCT) muuttamalla ei saatu todennettua. Lämpimästä neutraaliin värilämpötilaan väri-lämpö hypoteesi oli havaittavissa korkeammassa huonelämpötilassa.

### 7.2 Lämpöviihtyvyys

Lämpöviihtyvyydessä korkeammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan viihtyisimmäksi 2733 K värilämpötilalla. Seuraavaksi viihtyisimmäksi koehenkilöt kokivat huoneen lämpötilan 4084 K värilämpötilassa. Epäviihtyisimmäksi koehenkilöt kokivat huoneen lämpötilan 6208 K värilämpötilalla.

Lämpöviihtyvyydessä matalammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan viihtyisimmäksi neutraalissa värilämpötilassa. Seuraavaksi viihtyisimmäksi koehenkilöt kokivat huonelämpötilan kylmällä värilämpötilalla. Epäviihtyisimmäksi koehenkilöt kokivat huonelämpötilan lämpimällä värilämpötilalla.

Taulukossa 3 on esitetty kaikki mittaustulokset lämpöviihtyvyydestä. Sanallisesti arvioiden (kuva 10) korkeammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat huoneen lämpötilan hieman viihtyisänä kaikilla värilämpötiloilla. Matalammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat huoneen lämpötilan hieman epäviihtyisänä kaikilla värilämpötiloilla.

Matalammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan hieman epäviihtyisänä kaikilla värilämpötiloilla. Korkeammalla huonelämpötilalla koehenkilöt kokivat lämpötilan hieman viihtyisänä kaikilla värilämpötiloilla.

### 7.3 Lämpöaistimus

Kun kysyttiin koehenkilöiden lämpöaistimusta tilasta, niin korkeammalla huonelämpötilalla (26 °C) oli lämpimintä, kun värilämpötila oli lämmin (2733 K). Seuraavaksi eniten koettiin lämpöä kylmällä värilämpötilalla (6208 K). Kaikkein viileimmäksi tila koettiin neutraalissa värilämpötilassa (4084 K).

Kun kysyttiin koehenkilöiden lämpöaistimusta tilasta, niin matalammalla huonelämpötilalla (20 °C) oli lämpimintä, kun värilämpötila oli neutraali (4084 K). Seuraavaksi eniten koettiin lämpöä kylmällä värilämpötilalla (6208 K). Kaikkein viileimmäksi tila koettiin, kun värilämpötila oli lämmin (2733 K).

Sanallisesti arvioiden (kuva 10) korkeammalla huonelämpötilalla värilämpötilan ollessa lämmin, lämpöaistimus oli hieman lämmin. Neutraalilla värilämpötilalla lämpöaistimus oli neutraali. Kuitenkin kylmässä värilämpötilassa lämpöaistimus oli hieman lämmin. Matalammalla huonelämpötilalla kaikkien värilämpötilojen lämpöaistimukset olivat viileitä.

## **7.4 Käyttäjien arvioista**

Ilma koettiin raikkaammaksi matalammalla huonelämpötilalla. Tulos oli odotetun kaltainen ja kertoo samalla ilmanvaihdon olevan kunnossa koko koesessioden ajan. Koehenkilöt kokivat valoa olevan riittävästi molemmilla huonelämpötiloilla. Tämäkin tulos oli odotetun kaltainen, koska koetilan valaistusvoimakkuus pidettiin vakiona ja ilmaisee valaistusvoimakkuuden olleen tasainen. Valon väri koettiin melko miellyttäväksi molemmissa huonelämpötiloissa. Tulokseen on voinut vaikuttaa se, että värintoisto oli hyvä kaikilla värilämpötiloilla.

## Kirjallisuus

C Laurentin, V Berrutto and M Fontoynont. 2000. Effect of thermal conditions and light source type on visual comfort appraisal. *Lighting Research & Technology*. 32.4.223-233.L563.

Gesche Huebner, Stephanie Gauthier , Christoph Witzel , Wing-San Chan & David Shipworth. 2014. Seeing red, feeling hot? Research shows you could save energy by changing the colour of your office light. ICAP 2014. <http://www.ciscocreate.co.uk/blog/2014/7/30/seeing-red-feeling-hot-how-lighting-can-impact-your-perception-of-temperature>. Luettu 17.1.2014.

ISO 7730. 2006. Ergonomics of the thermal environment- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Eesti Standardikeskus. 64 p.

Juhani Hassi, Tiina Mäkinen, Ingvar Holmer, Arvid Posche, Tanja Risikko, Liisa Toivonen, Maisa Hurme. 2002. *Opas Kylmätyöhön*. Oulu. Työterveyslaitos. 111. ISBN-13: 9789518024623.

Pekka Tuomaala. 2014. Ihmisten yksilöllisten lämpöaistimusten arviointi. RYM/SY Kvartaaliseminaari. Teknologian tutkimuskeskus VTT.

Pekka Tuomaala. Riikka Holopainen. 2014. Ihmisen yksilöllisten ominaisuuksien vaikutus lämpöaistimukseen. Sisäilmastoseminaari. Teknologian tutkimuskeskus VTT.

Riikka Holopainen. Espoo 2012. A human thermal model for improved thermal comfort. Termisellä ihmismallilla parempaan lämpöviihtyvyyteen. Tohtorin väitöskirja. Aalto yliopisto. VTT Science 23. 141 p.

Robert W. Marans & Daniel Stokols. 1993. *Environmental Simulation. Research and Policy Issues*. Springer. New York. 334. 978-1-4899-1142-1. Part 7. Simulated Studies of Color, Arousal, and Comfort. Rikard Kuller and Byron Mikellides.

US Navy. US Navy Body fat calculator script. Ramui weblog. [http://ramui.com/Java\\_script\\_code\\_example/us-navy-body-fat-calculator-script.html](http://ramui.com/Java_script_code_example/us-navy-body-fat-calculator-script.html). Luettu 12.5.2015

Zumtobel. Product Portfolio 2014.

Zumtobel. PANOS INFINITY LED. downlight range. The new age of light and efficiency.



## **Liitteet**

Liite A. Lämpöiihtyvyytutkimuksen esittely.

Liite B. Esitietolomake.

Liite C. Testi 1.

Liite D. Testi 2.

Liite E. Testi 3.

Liite F. Koepöytäkirja.

## Lämpöviihtyvyydestutkimuksen esittely

Päälysvaatteet ja kengät laitetaan viereiseen lukittuun huoneeseen. Koehuoneessa on kaksi pöytää. Koehenkilö istuu pöydän ääressä kokeen ajan, liikkuminen huoneessa ei ole sallittua. Pöydän ja tuolin sijaintia ei pidä muuttaa.

Kysymyksiin tutustumisen voi aloittaa heti kokeen alettua. Netissä voi surffata pöydällä olevalla läppärillä tai voi lukea omaa kirjaa. Äänimerkki (ovikello) tulee ensimmäisen kerran 10 minuuttia kokeen alusta. Äänimerkin jälkeen tulee täyttää ensimmäinen testilomake (testi 1). Täyttäkää ensin rastiruutuun tehtävät ja sen jälkeen lämpötilan mittaus. Kokeen aikana muuta kohtiin voi mainita tuntemuksista. Kokeen aikana voi käyttää kännykkää, mutta äänimerkin jälkeen tulee keskittyä testilomakkeen täyttöön.

Toinen äänimerkki tulee 27 minuuttia kokeen alusta ja ohjeet ovat kuten edellä. Kolmas äänimerkki tulee 40 minuuttia kokeen alusta ja ohjeet ovat kuten edellä. Koe loppuu 43 minuuttia kokeen alusta.

Tuleva toinen osa tutkimusta on hyvin samankaltainen kuin nyt tehtävä tutkimus. Esitietolomaketta ei täytetä toista kertaa, jolloin tutkimusaika jää lyhyemmäksi.

Kiitos ensimmäiseen osaan osallistumisesta ja tervetuloa seuraavaan tutkimukseen.

## Welcome to research on thermal comfort

You can leave your coat and shoes to the nearby locked room. In the test room there is two tables. You should sit by the table all the time, moving around is not allowed. Do not change the position of the table or the chair.

You can get familiar with the questions after the test starts. You can use the internet connection with the laptop on the table or you can read your own papers. The sound signal (doorbell) will come first time about ten minutes from the start. After the signal, please fill in the first questionnaire page (named test 1).

Tick first the subjective evaluations and then do the temperature measurements. During the test you can also fill in the item "other" with your observations, if you like. You can use your mobile during the test, but please concentrate to the questionnaire after the signal.

Second signal will come after 27 minutes from the start. Then fill in the paper marked "test 2", instructions like above. Third signal will come 40 minutes from the start and then fill in paper "test 3". Test will end after 43 minutes from the start.

The second test that is done later will be very similar to this one. There is no need to fill the preliminary information sheet and therefore the test will be slightly shorter.

Thank you for participating to this first test and welcome to the second one.

### Esitiedot

Päivämäärä .....

Värinäkötesti .....

Silmälasit on/ei väritön/värillinen

Piilolasit on/ei väritön/värillinen/en tiedä

Pituus .....

Paino .....

Sukupuoli .....

Ikä .....

Vyötärön ympärysmitta .....

Kaulan ympärysmitta .....

Lantion ympärysmitta (naiset) .....

Valokuva .....

Pöytä numero .....

Sähköpostiosoite .....

Lämpötila otsasta t= ..... C°

## Liite C

### Kysymykset

#### Testi 1 ensimmäisen äänimerkin jälkeen

Merkitse viiva parhaiten kuvaavaan ruutuun lämpöaistimuksessa ja lämpöviihtyvyydessä.

##### Lämpöaistimus

Hyvin kuuma	Kuuma	Lämmin	Hieman lämmin	Neutraali	Hieman viileä	Viileä	Kylmä	Hyvin kylmä

--	--	--	--	--	--	--	--	--

##### Lämpöviihtyvyys

Erittäin viihtyisä			Hieman viihtyisä		Hieman epäviihtyisä			Hyvin epäviihtyisä

--	--	--	--	--	--	--	--	--

Vastaa seuraaviin väittämiin (1-7), 1 täysin eri mieltä...7 täysin samaa mieltä.

Merkitse rasti parhaiten kuvaavaan ruutuun.

		Ilma on raikas	X
7		Täysin samaa mieltä	
6			
5			
4			
3			
2			
1		Täysin eri mieltä	

		Valoa on riittävästi	X
7		Täysin samaa mieltä	
6			
5			
4			
3			
2			
1		Täysin eri mieltä	

		Valon väri on miellyttävä	X
7		Täysin samaa mieltä	
6			
5			
4			
3			
2			
1		Täysin eri mieltä	

##### Lämpötilan mittaus:

Otsasta t= ..... C°

Kämmenestä t= ..... C°

Kyynärvarresta t= ..... C°

Nilkasta t= ..... C°

Muuta:

## Liite D

### Kysymykset

#### Testi 2 toisen äänimerkin jälkeen

Merkitse viiva parhaiten kuvaavaan ruutuun lämpöaistimuksessa ja lämpöviihtyvyydessä.

##### Lämpöaistimus

Hyvin kuuma	Kuuma	Lämmin	Hieman lämmin	Neutraali	Hieman viileä	Viileä	Kylmä	Hyvin kylmä

--	--	--	--	--	--	--	--	--

##### Lämpöviihtyvyys

Erittäin viihtyisä			Hieman viihtyisä		Hieman epäviihtyisä			Hyvin epäviihtyisä

--	--	--	--	--	--	--	--	--

Vastaa seuraaviin väittämiin (1-7), 1 täysin eri mieltä...7 täysin samaa mieltä.

Merkitse rasti parhaiten kuvaavaan ruutuun.

		Ilma on raikas	X
7		Täysin samaa mieltä	
6			
5			
4			
3			
2			
1		Täysin eri mieltä	

		Valoa on riittävästi	X
7		Täysin samaa mieltä	
6			
5			
4			
3			
2			
1		Täysin eri mieltä	

		Valon väri on miellyttävä	X
7		Täysin samaa mieltä	
6			
5			
4			
3			
2			
1		Täysin eri mieltä	

Muuta:

##### Lämpötilan mittaus:

Otsasta t= ..... C°

Kämmenestä t= ..... C°

Kyynärvarresta t= ..... C°

Nilkasta t= ..... C°

## Liite E

### Kysymykset

#### Testi 3 kolmannen äänimerkin jälkeen

Merkitse viiva parhaiten kuvaavaan ruutuun lämpöaistimuksessa ja lämpöviihtyvyydessä.

##### Lämpöaistimus

Hyvin kuuma	Kuuma	Lämmin	Hieman lämmin	Neutraali	Hieman viileä	Viileä	Kylmä	Hyvin kylmä

--	--	--	--	--	--	--	--	--

##### Lämpöviihtyvyys

Erittäin viihtyisä			Hieman viihtyisä		Hieman epäviihtyisä			Hyvin epäviihtyisä

--	--	--	--	--	--	--	--	--

Vastaa seuraaviin väittämiin (1-7), 1 täysin eri mieltä...7 täysin samaa mieltä.

Merkitse rasti parhaiten kuvaavaan ruutuun.

		Ilma on raikas	X
7		Täysin samaa mieltä	
6			
5			
4			
3			
2			
1		Täysin eri mieltä	

		Valoa on riittävästi	X
7		Täysin samaa mieltä	
6			
5			
4			
3			
2			
1		Täysin eri mieltä	

		Valon väri on miellyttävä	X
7		Täysin samaa mieltä	
6			
5			
4			
3			
2			
1		Täysin eri mieltä	

Muuta:

Lämpötilan mittausta:

Otsasta t= ..... C°

Kämmenestä t= ..... C°

Kyynärvarresta t= ..... C°

Nilkasta t= ..... C°

## Liite F

Pvm ja klo.....

1. Kompensointilamput pois
2. Valokuva
3. Tutkimuksen esittely
4. Tarkista pukeutuminen
5. Esitietolomakkeen täyttö
6. Soita ovikelloa esimerkiksi
7. 43 min koe loppu ja ovi auki
8. Krs 1 takaisin
9. Kompensointilamput päälle

Krs	Aika [min]		Huoneen lämpötila <sub>t<sub>o</sub></sub> = C°
1	10 BEEP	0-10 min äänimerkki	Huoneen lämpötila <sub>t<sub>o</sub></sub> = C°
2	12		
3	13		
4	14		
5	15		
6	16		
7	17		
	27 BEEP	0-27 min äänimerkki	Huoneen lämpötila <sub>t<sub>o</sub></sub> = C°
8	29		
9	30		
10	31		
11	32		
12	33		
13	34		
14	35		
	40 BEEP		Huoneen lämpötila <sub>t<sub>o</sub></sub> = C°
	43	Loppu 0-43 min	